

Ministério de Educação e do Desporto
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais

Efeito da Forma da Onda sobre as Características de Fusão na
Soldagem MIG/MAG com Corrente Pulsada

por

Arnaldo Ruben Gonzalez

Trabalho realizado no Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas (**LS&TC**), Centro de Tecnologia (**CT**), do Departamento de Engenharia Metalúrgica da Escola de Engenharia da **UFRGS**, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (**PPGEM**).

Porto Alegre

1997

*Efeito da Forma da Onda sobre as Características de Fusão na
Soldagem MIG/MAG com Corrente Pulsada*

Tese de Doutorado

Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e
de Materiais -PPGEM/UFRGS, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de

Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Metalurgia de Transformação

por

Arnaldo Ruben Gonzalez

Engenheiro Eletromecânico
Mestre em Engenharia

1997

ESCOLA DE ENGENHARIA
BIBLIOTECA

Esta Tese foi julgada adequada para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia, Área de Concentração - Metalurgia de Transformação, em 04 de abril de 1997 pelo orientador e Banca Examinadora composta por:

Orientador:

- Prof. Dr. Ivan Guerra Machado
UFRGS - RS.

Banca Examinadora:

- Profa. Dra. Roseana da Exaltação Trevisan
UNICAMP - SP.

- Prof. Dr. Nelson Guedes de Alcântara
UFSCar - SP.

- Prof. Dr. Renato Machado de Brito
UFRGS - RS.

Coordenador do PPGEM
Prof. Dr. Luís Frederico P. Dick

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer às pessoas e instituições que, através de orientação, auxílio, compreensão e estímulo, foram fundamentais na realização desta tese.

Ao Prof. Dr. Ivan G. Machado, pela paciência e dedicação como amigo, orientador e professor universitário, em sete anos e meio da minha formação acadêmica (mestrado e doutorado). Exemplo de um profissional que realiza seu trabalho de forma eficiente, correta, e, acima de tudo, com paixão.

Ao Prof. Dr. Renato M. de Brito, pela disponibilidade, interesse, troca de informações e colaboração em aspectos relacionados à instrumentação, que foram muito importantes para a realização do trabalho.

Ao Prof. Dr. José L. Ribeiro, pela valiosa colaboração em aspectos de estatística experimental.

Aos Engenheiros Rocelito A. Lopes e Marcos Zuccoloto, pela valiosa colaboração em aspectos relacionados à instrumentação.

Ao meu caro colega e amigo José A.E. Mazzaferro, pelos muitos momentos que passamos trabalhando e discutindo resultados, os quais foram úteis durante a minha formação no LS&TC.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro.

Aos funcionários Luiz M. Zaniratti e Eng^o Márcio L. K. de Macedo, pela amizade e auxílio prestado.

A todos os amigos, funcionários e professores, que direta ou indiretamente participaram da realização dos trabalhos referentes a esta tese.

Sem nome, a todos os colegas do Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas, pelo companheirismo e ambiente de trabalho.

À minha querida Nanci, aos meus pais, Guillermina e Rodolfo, e aos meus irmãos, pela compreensão e estímulo para a realização desse trabalho.

Aos meus pais,
Guillermina Rios de Gonzalez e
Ramón Rodolfo Gonzalez

e aos meus irmãos,
Delia, Marisa, Ramón e Romilio.

SUMÁRIO

RESUMO.	I
ABSTRACT.	II
LISTA DE FIGURAS.	III
LISTA DE TABELAS.	XVIII
LISTA DE SÍMBOLOS.	XX
1.- INTRODUÇÃO.	1
2.- PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG CONVENCIONAL.	4
2.1.- Generalidades.	4
2.2.- Tipos de Fontes de Energia.	4
2.3.- Fatores que Afetam o Modo de Transferência.	5
2.3.1.- Classificação do Modo de Transferência.	6
2.4.- Efeito dos Parâmetros de Soldagem sobre a Transição Globular-Aerossol.	8
2.4.1.- Efeitos da Corrente de Soldagem e da Composição do Gás de Proteção sobre a Frequência da Gota.	8
2.4.2.- Efeito da Extensão do Arame.	9
3.- TEORIAS DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA.	11
3.1.- Teoria de Balanço das Forças Estáticas.	11
3.1.1.- Força Devido à Tensão Superficial.	12
3.1.2.- Força Devido ao Jato de Vapor Metálico.	14
3.1.3.- Força Devido à Aceleração da Gravidade.	14
3.1.4.- Força de Arraste.	15
3.1.5.- Força Eletromagnética.	16
3.1.6.- Limitações da Teoria de Balanço das Forças Estáticas.	18
3.2.- Teoria da Instabilidade “Pinch”.	18
3.3.- Outras Teorias.	20
4.- EFEITO DO MODO DE TRANSFERÊNCIA NO PROCESSO MIG/MAG CONVENCIONAL.	22
4.1.- Salpico.	22
4.2.- Taxa de Geração de Fumos.	23
4.2.1.- Efeito da Corrente de Soldagem e Composição do Gás de Proteção sobre a TGF.	23

4.2.2.- Efeito da Corrente de Soldagem e da Tensão do Arco Sobre a Taxa de Geração de Fumos.	24
4.3.- Taxa de Fusão do Arame.	25
4.4.- Modo de Transferência Aerossol Projetado.	26
4.4.1.- Formação do Pescoço na Ponta do Arame.	26
4.4.2.- Temperatura na Ponta do Arame.	27
4.4.3.- Modos de Transferência Projetado e Axial-Projetado.	28
5.- PROCESSO MIG/MAG PULSADO SINÉRGICO.	29
5.1.- Taxa de Fusão do Arame.	31
5.1.1.- Processo MIG/MAG Convencional.	31
5.1.2.- Processo MIG/MAG Pulsado.	34
5.1.3.- Taxa de Fusão e Velocidade de Alimentação do arame.	36
5.1.4.- Efeitos da Forma de Onda Trapezoidal sobre a Taxa de Fusão.	38
5.1.5.- Valores das Constantes Devido ao Arco Elétrico e ao Efeito Joule. ...	40
5.2.- Critérios para a Determinação dos Parâmetros de Pulso.	40
5.2.1.- Taxa de Fusão do Arame.	41
5.2.2.- Modo de Transferência de Massa.	43
5.2.3.- Estabilidade do Arco.	43
5.3.- Efeito das Correntes Médias e Contínua na Estabilidade do Arco.	44
5.3.1.- Efeito das Condições do Pulso na Característica de Transferência de Massa.	45
5.3.2.- Efeito da Corrente de Pico na Condição de uma Gota por Período de Pulso.	46
5.3.3.- Influência dos Parâmetros de Pico para a Obtenção do Modo Axial-Projetado.	48
5.3.4.- Modos de Transferência nos Processos MIG/MAG Convencional e Pulsado.	49
6.- TIPOS DE GASES DE PROTEÇÃO.	50
6.1.- Generalidades.	50
6.1.1.- Discussão Sucinta dos Tipos de Gases Comerciais de Proteção.	50
6.2.- Influência dos Gases de Proteção Sobre a Geometria do Cordão de Solda. ...	51
7.- INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NA GEOMETRIA DO	

CORDÃO DE SOLDA.	55
8.- CONTROLE SINÉRGICO.	58
8.1.- Microcomputador no Controle Sinérgico.	59
8.2.- Lógicas no Controle Sinérgico.	60
8.3.- Características Gerais dos Parâmetros de Pulso.	62
8.4.- Controle da Taxa de Fusão do Arame.	63
8.5.- Controle Feedback do Comprimento do Arco.	64
8.6.- Curvas Características da Fonte Pulsada.	64
9.- FÓRMULAS MATEMÁTICAS PARA O PROCESSO MIG/MAG PULSADO.	65
9.1.- Função Periódica.	65
9.2.- Corrente Média de Soldagem.	65
9.3.- Tensão Média do Processo de Soldagem.	65
9.4.- Potência Instantânea do Sistema.	65
9.5.- Potência Média do Sistema.	66
9.6.- Energia.	66
9.7.- Valor Eficaz (RMS).	67
9.8.- Energia Média de Soldagem.	68
9.9.- Correntes Média e Eficaz das Diferentes Formas de Ondas.	69
9.9.1.- Forma de Onda Retangular (A1).	70
9.9.2.- Forma de Onda Trapezoidal (A2).	70
9.9.3.- Forma de Onda Dente de Serra (A3).	71
9.9.4.- Forma de Onda Composta Crescente (A4).	72
9.9.5.- Forma de Onda Composta Decrescente (A5).	73
9.9.6.- Forma de Onda Combinada: retangular-trapezoidal (A6).	74
9.9.7.- Forma de Onda Triangular (A7).	75
9.10.- Tensão do Processo de Soldagem.	76
9.10.1.- Processo MIG/MAG Convencional.	76
9.10.1.1.- Queda de Tensão Devido à Resistência Elétrica de Contato.	77
9.10.1.2.- Queda de Tensão Devido à Extensão de Arame.	77
9.10.1.3.- Queda de Tensão Devido ao Ânodo.	77
9.10.1.4.- Queda de Tensão Devido ao Cátodo.	78
9.10.1.5.- Queda de Tensão Devido ao Arco Elétrico.	78
9.10.2.- Processo MIG/MAG Pulsado.	79

9.11.- Taxa Média de Fusão do Arame.	80
9.12.- Área Transversal do Metal de Adição.	84
9.13.- Análise da Massa e Energia no Cordão de Solda.	86
9.14.- Análises da Energia Média de Soldagem sobre as Eficiências de Fusão.	87
9.14.1.- Eficiência de Fusão do Consumível.	87
9.14.1.1- Eficiência de Fusão do Arame vs. Consumível.	88
9.14.2.- Eficiência de Fusão do Metal Base.	88
9.14.3.- Eficiência de Fusão do Processo.	89
10.- MÉTODOS, EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS.	91
10.1.- Fonte de Soldagem.	91
10.1.1.- Placa Inversora de Controle da Fonte.	92
10.1.2.- Método de Controle da Fonte.	93
10.2.- Dispositivo Universal de Soldagem.	93
10.3.- Osciloscópio Digital com Memória.	93
10.4.- Amplificador Opto-Acoplado.	94
10.5.- Transdutor de Corrente Elétrica.	94
10.6.- Placa de Aquisição de Dados.	94
11.- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.	96
11.1.Cordões de Solda Depositados sobre Chapa (“Bead-on-Plate”).	96
11.2.- Cordões de Solda em Junta Filete.	101
11.2.1.- Forma de Onda Retangular (A1).	103
11.2.2.- Forma de Onda Composta Decrescente (A5).	104
11.2.3.- Forma de Onda Triangular (A7).	106
12.- RESULTADOS E DISCUSSÃO.	108
12.1.- Cordões de Solda Depositados sobre Chapa (“Bead-on-Plate”).	108
12.1.1.- Efeito da Frequência e Forma da Onda de Tensão de Controle da Fonte de Soldagem Sobre a Corrente Média de Soldagem.	108
12.1.2.- Oscilogramas da Potência do Sistema.	120
12.1.3.- Potência do Sistema.	125
12.2.- Cordões de Solda em Filete.	125
12.2.1.- Forma de Onda Retangular (A1).	125

12.2.1.1.- Correntes Média e de Pico de Soldagem.	125
12.2.1.2.- Oscilogramas da Corrente de Soldagem, Tensão do Processo e Potência.	128
12.2.1.3.- Função Exponencial.	133
12.2.1.4.- Função Exponencial Combinada.	139
12.2.1.5.- Diferença Percentual das Potências.	140
12.2.2.- Forma de Onda Composta Decrescente (A5).	140
12.2.2.1.- Correntes Média e de Pico de Soldagem.	141
12.2.2.2.- Oscilogramas da Corrente de Soldagem, Tensão do Processo e Potência.	144
12.2.2.3.- Diferença Percentual das Potências.	148
12.2.3.- Forma de Onda Triangular (A7).	149
12.2.3.1.- Correntes Média e de Pico de Soldagem.	149
12.2.3.2.- Oscilogramas da Corrente de Soldagem, Tensão do Processo e Potência.	153
12.3.- Eficiência de Fusão do Arame.	158
12.3.1.- Cordões de Solda “Bead-on-Plate”.	158
12.3.2.- Forma de Onda Retangular (A1).	160
12.3.2.1.- Cordões de Solda em Filete.	160
12.3.2.2.- Cordões de Solda em Filete vs. “Bead-on-Plate”.	162
12.3.3.- Forma de Onda Composta Decrescente (A5).	162
12.3.3.1.- Cordões de Solda em Filete.	162
12.3.3.2.- Cordões de Solda em Filete vs. “Bead-on-Plate”.	164
12.3.4.- Forma de Onda Triangular (A7).	164
12.3.4.1.- Cordões de Solda em Filete.	164
12.3.4.2.- Cordões de Solda em Filete vs. “Bead-on-Plate”.	166
12.3.5.- Valor Médio da Eficiência de Fusão do Arame para o Processo.	166
12.4.- Área Transversal do Metal de Adição.	169
12.5.- Efeitos da Energia Média de Soldagem sobre as Eficiências de Fusão.	170
12.5.1.- Cordões de Solda “Bead-on-Plate”.	170
12.5.2.- Forma de Onda Retangular (A1).	173
12.5.3.- Forma de Onda Composta Decrescente (A5).	175
12.5.4.- Forma de Onda Triangular (A7).	177

12.6.- Considerações Finais das Eficiências de Fusão.	179
12.7.- Diluição.	180
13- CONCLUSÕES.	184
14.- SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.	186
15.- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	187
16.- ANEXOS.	194

RESUMO

Neste trabalho foram analisados alguns efeitos da forma e frequência da onda de tensão de controle sobre as características de saída da fonte de soldagem MIG/MAG pulsada, ou seja, corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema. Até o presente muito pouco foi realizado no sentido de se estudar, caracterizar e quantificar os possíveis efeitos da forma de onda de saída da fonte de soldagem sobre as características de fusão. Portanto, realizou-se um enfoque teórico/prático das variáveis elétricas do processo analisando-se diversas formas de onda de saída da fonte sobre as características de fusão.

Utilizando uma fonte do tipo MIG/MAG pulsada com diversas formas de ondas periódicas, foram feitas soldas de simples deposição sobre a superfície e tipo filete em chapas de aço baixo carbono, posição plana eletrodo positivo. Como metal de adição foi usado o arame AWS ER 70 S-6, e como gás de proteção uma mistura com 96 % de Ar e 4 % de CO₂.

Foram propostas fórmulas teóricas e verificadas experimentalmente, a partir de conceitos de eletricidade, para a determinação da potência média do sistema, energia média de soldagem, taxa média de fusão do arame e outras, e discutidas amplamente em função dos resultados experimentais, para o processo MIG/MAG pulsado e qualquer forma de onda inclusive aquelas analisadas neste trabalho. Também foram deduzidas fórmulas para determinar as eficiências de fusão do consumível, metal base e processo em função da energia média de soldagem.

Neste trabalho, foi definida a eficiência de fusão do arame como a relação entre a energia utilizada para fundir e destacar um volume de arame por período da onda e a fornecida por período da onda pela fonte de soldagem.

A eficiência de fusão do arame foi amplamente discutida com relação às diferentes formas de onda de saída da fonte de soldagem, em um largo espectro de parâmetros da onda.

Foi proposta uma nova relação entre a taxa média de fusão do arame e a potência média do sistema, levando-se em consideração os termos relativos ao aquecimento causado pela potência do arco elétrico e efeito Joule.

A eficiência de fusão do consumível, utilizada nesse trabalho, depende do produto das eficiências de deposição e de fusão do arame e, portanto, é uma função da energia média de soldagem, propriedades físicas do arame e seção transversal do metal de adição.

As eficiências de fusão do consumível, metal base e processo foram discutidas levando-se em consideração as diferentes formas de onda de saída da fonte de soldagem utilizadas neste trabalho. Foi estabelecida uma relação entre as eficiências fusão acima citadas e as variáveis principais de controle do processo MIG/MAG pulsado.

ABSTRACT

Some effects of reference control voltage waveform and frequency (input signal) on pulsed GMAW power output characteristics, i.e., welding current, process voltage, and power system have been analyzed in this work. Until now, not much has been realized on studying, characterizing and quantifying the waveform power output feasible effects on fusion characteristics. Therefore, a theoretical/practical aim of the process electrical variables has been realized, analyzing several power output waveforms on fusion characteristics.

Using a GMAW power source with several periodic waveforms, flat position bead-on-plate and fillet welds were deposited on low carbon steel with wire positive polarity current. Both AWS ER70S-6 filler wire and 96% Ar + 4% CO₂ shielding gas were used on these welds.

Theoretical formulas have been proposed and their validity were experimentally tested from electricity concepts to determine average power system, heat input, wire melting rate, etc., and largely discussed using experimental results, for pulsed GMAW power, and any output waveforms including those analyzed herein. Also, formulas have been deduced to determine the consumable, base metal, and process melting efficiencies as function of average heat input.

Wire melting efficiency has been defined herein as the ratio between the necessary energy to melt and detach a wire volume within a wave period and the released energy from the power source within the same wave period.

Wire melting efficiency has been largely discussed related to the different power output waveforms, in a wide wave parameters spectrum.

It has been purposed a new relationship between average wire melting rate and average power system, taking arc power heating and Joule effects terms into account.

Consumable melting efficiency, defined herein, depends on the product of deposition and wire melting efficiencies, and therefore, is a function of average heat input, wire physical properties, and weld reinforcement transversal cross-section area.

Consumable, base metal, and process melting efficiencies have been extensively discussed, taking into account the different power output waveforms used herein. Also, it was established a relationship between the above quoted melting efficiencies and the controlled pulsed GMAW process principal variables.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Processo de soldagem MIG/MAG.	4
Figura 2:	Características de saída tensão - corrente de duas diferentes fontes de soldagem. a - Tipo tensão constante; b - Tipo corrente constante.	5
Figura 3:	Classificação do modo de transferência de massa segundo IIW.	7
Figura 4:	Influência da composição do gás de proteção sobre a frequência da gota destacada /16/.	9
Figura 5:	Efeito da extensão do arame (s) sobre a frequência da gota destacada /16/. ...	10
Figura 6:	Forças atuantes sobre a gota metálica fundida na ponta do eletrodo /17-21/. .	12
Figura 7:	Forças interfaciais entre as três fases em equilíbrio /17/.	13
Figura 8:	Forças interfaciais de uma gota sessil sobre uma superfície sólida plana /17/. .	13
Figura 9:	Ilustração da coordenada (z, r) para discussão da força de Lorentz.	17
Figura 10:	Variação do fator f_2 em função do valor do ângulo de condução da corrente de soldagem /28/.	17
Figura 11:	Quantidade de calor da gota em função do modo de transferência de massa, A.- Globular; B.- Projetado; C.- Contínuo /35/.	22
Figura 12:	Efeito da composição do gás de proteção, no processo MIG/MAG convencional, sobre a taxa de geração de fumos /36/.	23
Figura 13:	Efeito da composição do gás de proteção, Ar+25%CO ₂ e CO ₂ , no processo MIG/MAG convencional, sobre a taxa de geração de fumos /36/.	24
Figura 14:	Influência do modo de transferência de massa na taxa de geração de fumos /37/. .	24
Figura 15:	Efeito da tensão e corrente de soldagem, para o processo MIG/MAG convencional e gás de proteção Ar+5%CO ₂ , sobre a taxa de geração de fumos /36/.	25
Figura 16:	Efeito da tensão do arco e da corrente de soldagem, no processo MIG/MAG convencional e gás de proteção CO ₂ , sobre a taxa de geração de fumos /36/.	25
Figura 17:	Influência do modo de transferência de massa na taxa de fusão do arame. A.- Globular; B.- Projetado; C.- Contínuo /37/.	26
Figura 18:	Parâmetros do pulso para a corrente de forma retangular.	29
Figura 19:	Efeito do tempo e corrente de pico sobre o volume da gota destacada /39/.	31
Figura 20:	Efeito da corrente e tempo de pico sobre o volume da gota destacada /39/.	31
Figura 21:	Representação esquemática, processo MIG/MAG convencional, a.- Simbologia -	

b.- Quedas de tensão em função do comprimento do arco.	34
Figura 22: Parâmetros da forma de onda de corrente trapezoidal.	39
Figura 23: Característica de fusão para varias combinações de <i>material-diâmetro do arame-gás de proteção</i> , processo MIG/MAG pulsado /40/.	41
Figura 24: Efeito das correntes de pico e base normalizadas em relação à corrente média (I_p/I_m , I_b/I_m e T_p/T), no processo MIG/MAG pulsado /40/.	42
Figura 25: Relação entre a corrente e tempo de pico para um volume de gota de 1,5 mm ³ , a.- Escala linear b.- Escala logarítmica /40/.	43
Figura 26: Diferentes zonas para vários valores de tensão do arco, corrente média e velocidade de alimentação do arame. a.- MIG/MAG convencional e b.- MIG/MAG pulsado. A - Zona Estável; B - Zona Instável; C - Zona com Muito Salpico /46/.	44
Figura 27: Variação dos parâmetros do pulso, para a obtenção de uma gota por período de pulso. A seta indica o instante em que ocorre a separação da gota /46/.	46
Figura 28: Zona estável de uma gota por período de pulso, em função da velocidade de alimentação do arame e tempo de pico /46/.	46
Figura 29: Zonas de estabilidade em função da velocidade de alimentação do arame, tempo e corrente de pico /46/.	47
Figura 30: Relações dos parâmetros de pico I_p , T_p e a velocidade de alimentação do arame, para a obtenção de uma gota por período de pulso /46/.	47
Figura 31: Classificação das regiões segundo o modo de transferência, no processo MIG/MAG pulsado, para diferentes combinação dos parâmetros de pico (I_p e T_p) /52/.	48
Figura 32: Relação entre a corrente de transição em função do diâmetro do arame, para correntes contínua e pulsado, e modos aerossol e axial-projetado, respectivamente /52/.	49
Figura 33: Influência da composição dos gases de proteção e espessura do metal base sobre o ângulo do reforço do cordão de solda. Também, mostra-se o valor médio da tensão do arco em função dos tipos de gases de proteção /54/.	52
Figura 34: Influência da composição dos gases de proteção e do diâmetro do arame sobre a penetração do cordão de solda. a.- Metal base: 25 mm; b.- Metal base: 6 mm /54/.	52
Figura 35: Efeito da composição dos gases de proteção e do diâmetro do arame sobre a	

área fundida do metal base. a.- Metal base: 25 mm; b.- Metal base: 6 mm /54/.	53
Figura 36: Eficiência de fusão do processo em função dos tipos de gases de proteção /54/.	54
Figura 37: Relação entre a velocidade de alimentação do arame e a energia de soldagem, para diferentes valores de corrente média de soldagem /56/.	55
Figura 38: Influência da velocidade de soldagem sobre a penetração do cordão de solda, e vários valores de corrente média /56/.	56
Figura 39: Efeito do produto da corrente média pela velocidade de soldagem sobre a diluição /57/.	56
Figura 40: Efeito do produto da corrente média pela velocidade de soldagem, e vários diâmetros de arame sobre a diluição /57/.	57
Figura 41: Efeito da corrente média e da velocidade de soldagem sobre o ângulo de reforço do cordão de solda /57/.	57
Figura 42: Efeito do comprimento do arco sobre a taxa de fusão do arame /47/.	60
Figura 43: Lógicas de controle na fonte sinérgica. a.- Fixo: T_p, I_e e variável: I_p, I_b, T_b ; b.- Fixo: T_p, I_p, I_b e variável: T_b /47/.	61
Figura 44: Relação entre os parâmetros de pico (I_p e T_p) sobre o tempo de separação da gota, para o arame de aço ao carbono e gás de proteção Ar+5%CO ₂ /59/.	61
Figura 45: Esquematização da seqüência da energia infinitesimal (dE_a) fornecida pela fonte de soldagem ao sistema, para um comprimento infinitesimal do cordão de solda (dl_s).	68
Figura 46: Parâmetros do pulso da corrente de soldagem (tensão de controle e potência do sistema), forma de onda retangular (A1).	70
Figura 47: Parâmetros do pulso da corrente de soldagem (tensão de controle e potência do sistema), forma de onda trapezoidal (A2).	71
Figura 48: Parâmetros do pulso da corrente de soldagem (tensão de controle e potência do sistema), forma de onda dente de serra (A3).	72
Figura 49: Parâmetros do pulso da corrente de soldagem (tensão de controle e potência do sistema), forma de onda composta crescente (A4).	72
Figura 50: Parâmetros do pulso da corrente de soldagem (tensão de controle e potência do sistema), forma de onda composta decrescente (A5).	73
Figura 51: Parâmetros do pulso da corrente de soldagem (tensão de controle e potência do sistema), forma de onda combinada retangular- trapezoidal (A6).	74
Figura 52: Parâmetros do pulso da corrente de soldagem (tensão de controle e potência do	

sistema), forma de onda triangular (A7).	75
Figura 53: Quedas de tensão no processo MIG/MAG convencional, eletrodo positivo (CCEP).	76
Figura 54: Esquema indicando-se os pontos de medição da tensão do processo e corrente de soldagem.	79
Figura 55: Esquema do volume instantâneo de fusão do arame ($v_a(t)$) e o comprimento do cordão de solda em função do tempo.	85
Figura 56: Esquema seção transversal do cordão de solda, das eficiências de fusão do processo, do metal base e do consumível.	89
Figura 57: Ciclo de trabalho da fonte para soldagem.	91
Figura 58: Característica tensão e corrente de saída da fonte para soldagem, para um valor dado de tensão de controle da fonte.	92
Figura 59: Desenho esquemático dos equipamentos utilizados na realização dos cordões de solda “bead-on-plate” e filete (A.O.A.: Amplificador Opto-Acoplado).	95
Figura 60: Formas da onda de tensão de controle da fonte de soldagem, obtidas na saída do conversor D/A, utilizadas na realização do cordão de solda “bead-on-plate”, posição plana.	97
Figura 61: Esquema do metal base e dimensões dos corpos de prova extraídos para metalografia (todas as unidades de comprimento em mm e os ângulos em graus).	102
Figura 62: Parâmetros da onda da tensão de controle da fonte (corrente de soldagem e potência do sistema), forma de onda retangular (A1).	103
Figura 63: Parâmetros da onda da tensão de controle da fonte (corrente de soldagem e potência do sistema), forma de onda composta decrescente (A5).	105
Figura 64: Parâmetros da onda da tensão de controle da fonte (corrente de soldagem e potência do sistema), forma de onda triangular (A7).	106
Figura 65: Valores médios observados da corrente média de soldagem em função da frequência e forma da onda de tensão de controle da fonte, cordão de solda “bead-on-plate”, 1G.	110
Figura 66a: Comparação dos formatos do pulso da onda entre a tensão de controle da fonte e a corrente de soldagem e tensão do processo em função do tempo. ..	112

Figura 66b: Comparação dos formatos do pulso da onda entre a tensão de controle da fonte e a corrente de soldagem e tensão do processo em função do tempo. ..	113
Figura 66c: Comparação dos formatos do pulso da onda entre a tensão de controle da fonte e a corrente de soldagem e tensão do processo em função do tempo. ..	114
Figura 66d: Comparação dos formatos do pulso da onda entre a tensão de controle da fonte e a corrente de soldagem e tensão do processo em função do tempo. ..	115
Figura 66e: Comparação dos formatos do pulso da onda entre a tensão de controle da fonte e a corrente de soldagem e tensão do processo em função do tempo. ..	116
Figura 66f: Comparação dos formatos do pulso da onda entre a tensão de controle da fonte e a corrente de soldagem e tensão do processo em função do tempo. ..	117
Figura 66g: Comparação dos formatos do pulso da onda entre a tensão de controle da fonte e a corrente de soldagem e tensão do processo em função do tempo. ..	118
Figura 67: Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (P_{ot}), forma de onda retangular (A1), frequência 25 Hz (B1).	119
Figura 68: Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (P_{ot}), forma de onda retangular (A1), frequência 50 Hz (B2).	119
Figura 69: Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (P_{ot}), forma de onda retangular (A1), frequência 75 Hz (B3).	120
Figura 70: Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (P_{ot}), forma de onda retangular (A1), frequência 100 Hz (B4).	120
Figura 71: Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (P_{ot}), forma de onda trapezoidal (A2), frequência 25 Hz (B1).	120
Figura 72: Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (P_{ot}), forma de onda trapezoidal (A2), frequência 50 Hz (B2).	120
Figura 73: Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (P_{ot}), forma de onda trapezoidal (A2), frequência 75 Hz (B3).	120

Figura 74:	Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (P_{ot}), forma de onda trapezoidal (A2), frequência 100 Hz (B4).	120
Figura 75:	Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (P_{ot}), forma de onda dente de serra (A3), frequência 25 Hz (B1).	121
Figura 76:	Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (P_{ot}), forma de onda dente de serra (A3), frequência 50 Hz (B2).	121
Figura 77:	Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (P_{ot}), forma de onda dente de serra (A3), frequência 75 Hz (B3).	121
Figura 78:	Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (P_{ot}), forma de onda dente de serra (A3), frequência 100 Hz (B4).	121
Figura 79:	Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (P_{ot}), forma de onda composta crescente (A4), frequência 25 Hz (B1).	121
Figura 80:	Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (P_{ot}), forma de onda composta crescente (A4), frequência 50 Hz (B2).	121
Figura 81:	Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (P_{ot}), forma de onda composta crescente (A4), frequência 75 Hz (B3).	122
Figura 82:	Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (P_{ot}), forma de onda composta crescente (A4), frequência 100 Hz (B4).	122
Figura 83:	Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (P_{ot}), forma de onda composta decrescente (A5), frequência 25 Hz (B1).	122
Figura 84:	Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (P_{ot}), forma de onda composta decrescente (A5), frequência 50 Hz (B2).	122

Figura 85: Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (P_{ot}), forma de onda composta decrescente (A5), frequência 75 Hz (B3).	122
Figura 86: Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (P_{ot}), forma de onda composta decrescente (A5), frequência 100 Hz (B4).	122
Figura 87: Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (P_{ot}), forma de onda combinada (A6), frequência 25 Hz (B1).	123
Figura 88: Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (P_{ot}), forma de onda combinada (A6), frequência 50 Hz (B2).	123
Figura 89: Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (P_{ot}), forma de onda combinada (A6), frequência 75 Hz (B3).	123
Figura 90: Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (P_{ot}), forma de onda combinada (A6), frequência 100 Hz (B4).	123
Figura 91: Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (P_{ot}), forma de onda triangular (A7), frequência 25 Hz (B1).	123
Figura 92: Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (P_{ot}), forma de onda triangular (A7), frequência 50 Hz (B2).	123
Figura 93: Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (P_{ot}), forma de onda triangular (A7), frequência 75 Hz (B3).	124
Figura 94: Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (P_{ot}), forma de onda triangular (A7), frequência 100 Hz (B4).	124
Figura 95: Valores observados da potência média (P_m) e da potência determinada como produto da corrente média de soldagem e tensão média do processo (POT) em função da corrente média de soldagem, cordão de solda “bead-on-plate”,	

posição plana.	124
Figura 96: Valores médios observados da corrente média de soldagem em função da frequência da onda e da tensão de controle de pico da fonte, cordão de solda em filete, 1F.	126
Figura 97: Valores observados das correntes média e pico de soldagem em função da frequência da onda, tensão de controle de pico da fonte (V_{R-p}) 7,5 V, cordão de solda em filete, 1F.	126
Figura 98: Valores observados das correntes média e pico de soldagem em função da frequência da onda, tensão de controle de pico da fonte (V_{R-p}) 8,0 V, cordão de solda em filete, 1F.	127
Figura 99: Valores observados das correntes média e pico de soldagem em função da frequência da onda, tensão de controle de pico da fonte (V_{R-p}) 8,5 V, cordão de solda em filete, 1F.	127
Figura 100: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 100$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 7,5 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).	128
Figura 101: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 100$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,0 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).	128
Figura 102: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 100$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).	128
Figura 103: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 150$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 7,5 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).	129
Figura 104: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 150$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,0 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).	129
Figura 105: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 150$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).	129
Figura 106: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 200$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 7,5 V, forma de	

onda retangular, junta filete, posição plana (1F).	130
Figura 107: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 200$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,0 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).	130
Figura 108: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 200$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).	130
Figura 109: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 250$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 7,5 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).	131
Figura 110: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 250$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,0 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).	131
Figura 111: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 250$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).	131
Figura 112: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 300$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 7,5 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).	132
Figura 113: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 300$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,0 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).	132
Figura 114: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 300$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).	132
Figura 115: Forma de onda exponencial da corrente de soldagem.	133
Figura 116: Função exponencial da corrente de soldagem, $F = 300$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).	135
Figura 117: Função exponencial da potência do sistema, $F = 300$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).	136
Figura 118: Forma de onda exponencial combinada da corrente de soldagem.	137

Figura 119: Função exponencial combinada da corrente de soldagem, $F = 200$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 7,5 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).	138
Figura 120: Função exponencial combinada da potência do sistema, $F = 200$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 7,5 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).	139
Figura 121: Diferença percentual das potências (ep , %) em função da interação da potência média do sistema e da tensão de controle de pico da fonte (V_{R-p}), cordão de solda em filete, 1F.	140
Figura 122: Valores médios observados da corrente média de soldagem em função da frequência da onda e da tensão de controle de pico da fonte, cordão de solda em filete, 1F.	142
Figura 123: Valores observados das correntes média e pico de soldagem em função da frequência da onda, tensão de controle de pico da fonte (V_{R-p}) 7,5 V, cordão de solda em filete, 1F.	142
Figura 124: Valores observados das correntes média e pico de soldagem em função da frequência da onda, tensão de controle de pico da fonte (V_{R-p}) 8,0 V, cordão de solda em filete, 1F.	143
Figura 125: Valores observados das correntes média e pico de soldagem em função da frequência da onda, tensão de controle de pico da fonte (V_{R-p}) 8,5 V, cordão de solda em filete, 1F.	143
Figura 126: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 100$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 7,5 V, forma de onda composta decrescente (A5), junta filete, posição plana (1F).	144
Figura 127: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 100$ Hz, tensão de controle (V_{R-p}) = 8,0 V, forma de onda composta decrescente (A5), junta filete, posição plana (1F).	144
Figura 128: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 100$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda composta decrescente (A5), junta filete, posição plana (1F).	145
Figura 129: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 150$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 7,5 V, forma de onda composta decrescente (A5), junta filete, posição plana (1F).	145

Figura 130: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 150$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,0 V, forma de onda composta decrescente (A5), junta filete, posição plana (1F).	145
Figura 131: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 150$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda composta decrescente (A5), junta filete, posição plana (1F).	146
Figura 132: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 200$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 7,5 V, forma de onda composta decrescente (A5), junta filete, posição plana (1F).	146
Figura 133: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 200$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,0 V, forma de onda composta decrescente (A5), junta filete, posição plana (1F).	146
Figura 134: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 200$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda composta decrescente (A5), junta filete, posição plana (1F).	147
Figura 135: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 250$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 7,5 V, forma de onda composta decrescente (A5), junta filete, posição plana (1F).	147
Figura 136: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 250$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,0 V, forma de onda composta decrescente (A5), junta filete, posição plana (1F).	147
Figura 137: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 250$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda composta decrescente (A5), junta filete, posição plana (1F).	148
Figura 138: Diferença percentual das potências (ep , %) em função da interação da potência média do sistema (P_m) e a tensão de controle de pico da fonte (V_{R-p}) cordão de solda em filete, 1F.	149
Figura 139: Tempos de crescimento (T_{R-1}) e decréscimo (T_{R-3}) da tensão de controle para os valores de frequência da onda.	151
Figura 140: Valores observados da corrente média de soldagem em função dos tempos de crescimento (T_{R-1}) e decréscimo (T_{R-3}) da tensão de controle, e tensão de controle de pico.	151
Figura 141: Valores observados das correntes média e pico de soldagem em função da	

freqüência da onda, tensão de controle de pico (V_{R-p}) 7,5 V, cordão de solda em filete, 1F.	152
Figura 142: Valores observados das correntes média e pico de soldagem em função da freqüência da onda, tensão de controle de pico (V_{R-p}) 8,0 V, cordão de solda em filete, 1F.	152
Figura 143: Valores observados das correntes média e pico de soldagem em função da freqüência da onda, tensão de controle de pico (V_{R-p}) 8,5 V, cordão de solda em filete, 1F.	153
Figura 144: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 100$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 7,5 V, forma de onda triangular (A7), junta filete, posição plana (1F).	154
Figura 145: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 100$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,0 V, forma de onda triangular (A7), junta filete, posição plana (1F).	154
Figura 146: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 100$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda triangular (A7), junta filete, posição plana (1F).	154
Figura 147: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 150$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 7,5 V, forma de onda triangular (A7), junta filete, posição plana (1F).	155
Figura 148: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 150$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,0 V, forma de onda triangular (A7), junta filete, posição plana (1F).	155
Figura 149: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 150$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda triangular (A7), junta filete, posição plana (1F).	155
Figura 150: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 200$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 7,5 V, forma de onda triangular (A7), junta filete, posição plana (1F).	156
Figura 151: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 200$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,0 V, forma de onda triangular (A7), junta filete, posição plana (1F).	156
Figura 152: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do	

<p>sistema, $F = 200$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda triangular (A7), junta filete, posição plana (1F).</p> <p>Figura 153: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 250$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 7,5 V, forma de onda triangular (A7), junta filete, posição plana (1F).</p> <p>Figura 154: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 250$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,0 V, forma de onda triangular (A7), junta filete, posição plana (1F).</p> <p>Figura 155: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 250$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda triangular (A7), junta filete, posição plana (1F).</p> <p>Figura 156: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 300$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,0 V, forma de onda triangular (A7), junta filete, posição plana (1F).</p> <p>Figura 157: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 300$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda triangular (A7), junta filete, posição plana (1F).</p> <p>Figura 158: Valores médios da eficiência de fusão do arame em função da potência média do sistema e da forma de onda da tensão de controle, cordão de solda “bead-on-plate”, 1G.</p> <p>Figura 159: Valores médios da eficiência de fusão do arame em função da frequência e da tensão V_{R-p} da forma de onda retangular, cordão de solda em filete, posição plana.</p> <p>Figura 160: Valores médios da eficiência de fusão do arame em função da potência média do sistema e tensão V_{R-p} da forma de onda retangular, para as juntas tipo “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F).</p> <p>Figura 161: Valores médios da eficiência de fusão do arame em função da frequência e da tensão V_{R-p} da forma de onda composta decrescente, cordão de solda em filete, posição plana.</p> <p>Figura 162: Valores médios da eficiência de fusão do arame em função da potência média do sistema e tensão V_{R-p} da forma de onda composta decrescente, para as juntas tipo “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F).</p> <p>Figura 163: Valores médios da eficiência de fusão do arame em função da frequência e</p>	<p>156</p> <p>157</p> <p>157</p> <p>157</p> <p>158</p> <p>158</p> <p>159</p> <p>161</p> <p>162</p> <p>163</p> <p>164</p>
---	--

da tensão V_{R-p} da forma de onda triangular, cordão de solda em filete, posição plana.	165
Figura 164: Valores médios da eficiência de fusão do arame em função da potência média do sistema e tensão V_{R-p} da forma de onda triangular, para as juntas tipo “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F).	166
Figura 165: Valores observados e médio geral da eficiência de fusão do arame em função da potência média do sistema, para os cordões de solda “bead-on- plate” e filete, posição plana.	167
Figura 166: Histograma de frequência dos valores observados e médio geral da eficiência de fusão do arame, para os cordões de solda “bead-on-plate” e filete, posição plana.	168
Figura 167: Taxa média de fusão do arame em função da potência média do sistema, para todas as formas de onda utilizadas na realização dos cordões de solda “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F).	168
Figura 168: Valores obtidos da área transversal do metal de adição e da taxa média de fusão do arame, e a reta de regressão linear.	170
Figura 169: Valores médios da eficiência de fusão do processo em função da energia média de soldagem e da forma de onda da tensão de controle, junta “bead- on-plate”, posição plana (1G).	172
Figura 170: Valores médios da eficiência de fusão do metal base em função da energia média de soldagem e da forma de onda da tensão de controle, junta “bead- on-plate”, posição plana (1G).	172
Figura 171: Valores médios da eficiência de fusão do consumível em função da energia média de soldagem e da forma de onda da tensão de controle, junta “bead- on-plate”, posição plana.	173
Figura 172: Valores médios da eficiência de fusão do metal base em função da energia média de soldagem, para as juntas tipo “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F), forma de onda retangular (A1).	174
Figura 173: Valores médios da eficiência de fusão do consumível em função da energia média de soldagem, para as juntas tipo “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F), forma de onda retangular (A1).	174
Figura 174: Valores médios da eficiência de fusão do processo em função da energia média de soldagem, para as juntas tipo “bead-on-plate” e filete, posição	

plana (1G, 1F), forma de onda retangular (A1).	175
Figura 175: Valores médios da eficiência de fusão do metal base em função da energia média de soldagem, para as juntas tipo “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F), forma de onda composta decrescente (A5).	176
Figura 176: Valores médios da eficiência de fusão do consumível em função da energia média de soldagem, para as juntas tipo “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F), forma de onda composta decrescente (A5).	176
Figura 177: Valores médios da eficiência de fusão do processo em função da energia média de soldagem, para as juntas tipo “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F), forma de onda composta decrescente (A5).	177
Figura 178: Valores médios da eficiência de fusão do metal base em função da energia média de soldagem, para as juntas tipo “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F), forma de onda triangular (A7).	178
Figura 179: Valores médios da eficiência de fusão do consumível em função da energia média de soldagem, para as juntas tipo “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F), forma de onda triangular (A7).	178
Figura 180: Valores médios da eficiência de fusão do processo em função da energia média de soldagem, para as juntas tipo “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F), forma de onda triangular (A7).	179
Figura 181: Valores médios da diluição em função da energia média de soldagem e da forma de onda da tensão de controle, cordão de solda “bead-on-plate”, posição plana (1G).	181
Figura 182: Efeito da energia média de soldagem sobre a diluição, para as juntas tipo “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F), forma de onda retangular. ..	182
Figura 183: Efeito da energia média de soldagem sobre a diluição, para as juntas tipo “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F), forma de onda composta decrescente (A5).	182
Figura 184: Efeito da energia média de soldagem sobre a diluição, para as juntas tipo “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F), forma de onda triangular (A7).	183

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos modos de transferência de massa, segundo a IIW.	8
Tabela 2: Comparação de alguns valores das constantes devido ao arco (K_1) e ao efeito Joule (K_2).	40
Tabela 3: Descrição das conexões de entrada do sinal analógico na placa ICB.	92
Tabela 4: Parâmetros operacionais utilizados durante a realização dos cordões de solda “bead-on-plate”, 1G.	96
Tabela 5: Valores dos parâmetros da onda de tensão de controle para cada combinação de tratamento, cordão de solda “bead-on-plate”, posição plana.	99
Tabela 6: Combinação de tratamento dada pelos níveis dos parâmetros “ A_iB_j ” e a sequência para a realização do cordão de solda “bead-on-plate”, posição plana.	100
Tabela 7: Parâmetros operacionais utilizados durante a realização dos cordões de solda em filete, posição plana (1F).	101
Tabela 8: Parâmetros de tempo da onda de tensão de controle da fonte de soldagem, para cada combinação de tratamento (frequência da onda e tensão de controle de pico da fonte).	104
Tabela 9: Parâmetros de tempo da onda de tensão de controle da fonte de soldagem, para cada combinação de tratamento (frequência da onda e tensão de controle de pico da fonte).	105
Tabela 10: Parâmetros de tempo da onda de tensão de controle da fonte de soldagem, para cada combinação de tratamento (frequência da onda e tensão de controle de pico da fonte).	107
Tabela 11: Análise de variância (ANOVA) para valores da corrente média de soldagem ($I_m - A$).	109
Tabela 12: Valores das constantes de tempo, corrente média de soldagem e potência média do sistema, para a forma de onda retangular e frequência da onda 300 Hz, junta filete, 1F.	136
Tabela 13: Valores da média, do desvio padrão e da variância da eficiência de fusão do arame em função da frequência e forma de onda, cordão de solda “bead-on-plate”, 1G.	160
Tabela 14: Valores da média, do desvio padrão e da variância da eficiência de fusão do arame em função da frequência da onda e da tensão de controle de pico,	

cordão de solda em filete, 1F.	161
Tabela 15: Valores da média, do desvio padrão e da variância da eficiência de fusão do arame em função da frequência da onda e da tensão de controle de pico, cordão de solda em filete, 1F.	163
Tabela 16: Valores da média, do desvio padrão e da variância da eficiência de fusão do arame em função da frequência da onda e da tensão de controle de pico, cordão de solda em filete, 1F.	165
Tabela 17: Análise de variância (ANOVA) da equação de regressão linear da taxa média de fusão do arame e a potência média do sistema.	168
Tabela 18: Análise de variância (ANOVA) da equação de regressão linear da área transversal do metal de adição em função da taxa média de fusão do arame. ..	169

LISTA DE SÍMBOLOS

$\bar{\rho}$: Resistividade média da extensão do arame;

ΔI : Variação de corrente de soldagem;

Δs : Variação da extensão do arame durante a soldagem;

ΔU : Variação de tensão do processo;

$-m_2 = -\left[\frac{\Delta I}{\Delta T}\right]_D = -\frac{i_p - I_b}{T_3}$: Taxa de decréscimo da corrente, desde o valor de pico ao de

base;

$m_1 = \left[\frac{\Delta I}{\Delta T}\right]_s = \frac{i_p - I_b}{T_1}$: Taxa de incremento da corrente desde o valor de base ao de pico;

ε : Amplitude da perturbação da coluna líquida;

θ : Ângulo da interface líquido-sólido;

φ : Ângulo de condução da área anódica;

δ : Ângulo de reforço do cordão de solda;

Ψ : Ângulo entre a vertical e o eixo do arco [$g_z = 9,81 \cdot \cos \Psi$];

λ : Comprimento da flutuação de instabilidade da coluna líquida;

λ_c : Comprimento crítico da onda de instabilidade;

λ_{p1} : Constante de tempo da potência $p_{1(t)}$;

λ_{p3} : Constante de tempo da potência $p_{3(t)}$;

λ_1 : Constante de tempo da corrente de soldagem $i_{1(t)}$;

λ_3 : Constante de tempo da corrente de soldagem $i_{3(t)}$;

γ : Energia livre de superfície;

ξ : Fator que considera a deformação da seção transversal em relação à original;

η : Viscosidade;

ϕ : Função trabalho que depende da composição química do material do arame;

$\phi_a \cdot I$: Energia potencial convertida pelos elétrons quando atingem o ânodo;

α e β : São os ângulos mostrados na Fig.9;

μ_0 : Permeabilidade do vácuo;

Γ_1 : Tempo necessário para o aquecimento e a formação do pescoço;

Γ_2 : Tempo necessário para o crescimento da gota;

$U_T = (2/3) \cdot k \cdot T_e / e$: Queda de tensão devido ao aumento de temperatura produzido pelos elétrons que chegam ao ânodo;

Γ_3 : Tempo de separação da gota, no qual, o pescoço é aquecido até o ponto de ebulição, a separação da gota ocorre;

δ_a : Densidade de massa do arame;

η_{AB} : Eficiência de fusão do metal base;
 η_{AR} : Eficiência de fusão do consumível;
 η_d : Eficiência de deposição;
 η_{fa} : Eficiência de fusão do arame;
 η_p : Eficiência de fusão do processo;
 δE_a : Energia média de soldagem;
 ρ_m : Densidade da gota fundida e destacada;
 ρ_{pl} : Densidade do plasma;
 (r, ϕ, z) : Coordenada do cilindro simétrico;
 $\gamma_{sv}, \gamma_{sl}, \gamma_{lv}$: Energia livre por unidade de área da interface;
 A : Área transversal do arame (eletrodo);
 a, b : Constantes de proporcionalidade;
 AB : Área transversal fundida do metal base;
 AR : Área transversal do metal de adição;
 $AR_{(t)}$: Área transversal instantânea do metal de adição;
 B : Indução magnética;
 C : Valor limite da corrente base para a estabilidade do arco;
 Ca : Constante de capilaridade;
 Ccs : Comprimento do cordão de solda;
 C_d : Coeficiente de arraste, sendo função do número de Reynolds $Re = 2 \cdot V_{pl} \cdot R \cdot \rho_{pl} / \eta$;
 C_{de} : Coeficiente de arraste para um corpo esférico;
 d : Diâmetro do arame (eletrodo);
 D : Diluição;
 $d(\delta E_a)$: Acréscimo infinitesimal da energia por comprimento de cordão de solda;
 dE_a : Acréscimo infinitesimal da energia absorvida pelo sistema;
 dl_s : Comprimento infinitesimal do cordão de solda;
 E : Campo elétrico no arco;
 E_a : Energia absorvida pelo sistema;
 ep : Diferença percentual das potências;
 F : Frequência da onda;
 F_d : Força de arraste devido ao fluxo do gás de proteção;
 F_e : Força eletromagnética;
 F_g : Força devido à aceleração da gravidade;
 $f_L = \vec{j} \times \vec{B}$: Força de Lorentz;
 F_L : Força de Lorentz sobre a gota é a integral de $(f_L)_z$ em todo o volume;

f_p : Frequência da perturbação da coluna líquida;
 F_s : Força devido à tensão superficial;
 $f_{(t)}$: Uma função contínua qualquer dependente do tempo;
 F_v : Força devido ao vapor da superfície da gota do metal líquido;
 g : Aceleração da gravidade;
 $G(\alpha, \beta)$: Fator geométrico equivalente a f_2 , é função do ângulo de condução “ ϕ ”;
 g_z : Componente vertical da aceleração devido à gravidade;
 $h_a \equiv h_{mb} \equiv h$: Quantidade de calor necessária para fundir um volume de aço ao carbono;
 H_0 : Constante experimental que representa o total de energia por unidade de volume necessária para fundir o arame e destacar a gota;
 h_a : Quantidade de calor necessária para fundir um volume de arame;
 $H_a = \phi_j j / v$: Quantidade de calor do ânodo;
 h_{mb} : Quantidade de calor necessária para fundir um volume do metal base;
 I : Corrente contínua de soldagem;
 i : Número inteiro, ($= 1, 2, 3, \dots, m$);
 $i_{(t)}$: Corrente instantânea de soldagem;
 I_b : Corrente de base de soldagem;
 I_{bo} : Constante de proporcionalidade da corrente de base para $W = 1$ m/min;
 \hat{I}_b : Valor final da corrente de base para um tempo $t \gg (I/\lambda_3)$;
 $I_e = I_p - I_b$: Excesso de corrente de soldagem;
 I_{ef} : Corrente eficaz de soldagem;
 I_{eo} : Constante de proporcionalidade do excesso de corrente para $W = 1$ m/min;
 I_g : Corrente que circula através da gota; não é necessariamente igual aos elétrons que entram no arame-eletrodo;
 I_m : Corrente média de soldagem;
 I_p : Amplitude do pulso ou corrente de pico de soldagem;
 I_{pl} : Corrente do plasma (ou arco);
 \hat{I}_p : Valor final da corrente de pico para um tempo $t \gg (I/\lambda_1)$;
 I_{pmin} : Valor mínimo da corrente de pico de soldagem;
 I_w : Corrente que circula através do arame;
 j : Densidade de corrente de soldagem;
 j_{pl} : Densidade de corrente do plasma;
 j_w : Densidade de corrente que circula através do arame;
 k : Constante de Boltzman;
 k_0 : Interseção na ordenada;

K_{01} e K_{02} : Constantes de proporcionalidade;
 K_1 : Constante proporcional ao arco elétrico;
 K_2 : Constante proporcional ao efeito Joule;
 K_a : Constante de conversão de unidades;
 $K_{fa} = 1/(K_a \cdot A \cdot h_a)$: Coeficiente de fusão do arame;
 K_v : Constante para um determinado volume de gota transferido por período de pulso, para cada combinação de *material-diâmetro do arame-gás de proteção*;
 L : Comprimento do arco (constante);
 $L_{(t)}$: Comprimento instantâneo do arco elétrico (variável);
 M : Massa da gota fundida e destacada;
 m : Número inteiro, (= 1, 2, 3...);
 m_a : Taxa de fluxo de massa por unidade de superfície;
 $M_{fa(t)}$: Massa fundida do arame por unidade de tempo;
 m_{fa} : Fator de fusão do arame;
 m_i : Fator que considera a deformação da seção transversal em relação à original, podendo ser “0”, “1” e “2”;
 n_e : Densidade de elétrons;
 \hat{P}_b : Valor final da potência de base para um tempo $t \gg (1/\lambda_{p3})$;
 $Pot = U_m \cdot i_{(t)}$: Potência do sistema obtida do produto da tensão média do processo pela corrente instantânea de soldagem;
 $POT = U_m \cdot I_m$: Potência do sistema obtida do produto da corrente média de soldagem pela tensão média do processo;
 $p_{(t)}$: Potência instantânea do sistema;
 $p_{arc(t)}$: Potência no arco elétrico;
 P_m : Potência média do sistema;
 \hat{P}_p : Valor final da potência de pico para um tempo $t \gg (1/\lambda_{p1})$;
 $p_{r(t)}$: Potência dissipada na resistência elétrica do circuito de soldagem (R_0);
 $p_{s(t)}$: Potência devido ao efeito Joule, na extensão do arame;
 Q_{total} : Calor total que entra no arame;
 r : Raio da coluna líquida, para o arame é igual ao raio do eletrodo;
 R : Raio da gota (imersa no plasma);
 r : Raio do arame (eletrodo);
 R_o : Resistência elétrica do circuito de soldagem;
 R_{es} : Resistor;
 S : Área de contato;

s : Extensão do arame;
 $s_{(t)}$: Extensão instantânea do arame;
 T : Período da onda (função ou pulso);
 t_0 : Tempo em um instante qualquer;
 T_1 : Tempo para aumentar a corrente (tensão ou potência) de base à pico;
 T_2 : Tempo em que atua a corrente (tensão ou potência) de pico;
 T_3 : Tempo para reduzir a corrente (tensão ou potência) de pico à base;
 T_4 : Tempo em que atua a corrente (tensão ou potência) de base;
 T_b : Tempo de base ou duração da corrente (tensão ou potência) de base, $T_3 + T_4$;
 T_e : Temperatura dos elétrons que entram no eletrodo;
 TGF : Taxa de Geração de Fumos;
 T_m : Temperatura;
 T_p : Tempo de pico ou duração da corrente (tensão ou potência) de pico, $T_1 + T_2$;
 T_{pmax} : Valor máximo do tempo de pico;
 T_{pmin} : Valor mínimo do tempo de pico;
 T_{po} : Constante de proporcionalidade do tempo de pico para $W = 1$ m/min;
 T_{R-1} : Tempo para aumentar a tensão de controle de base (V_{R-b}) à pico (V_{R-p});
 T_{R-2} : Tempo em que atua a tensão de controle de pico (V_{R-p});
 T_{R-3} : Tempo para reduzir a tensão de controle de pico (V_{R-p}) à base (V_{R-b});
 T_{R-4} : Tempo em que atua a tensão de controle de base (V_{R-b});
 T_{R-b} : Tempo de base ou duração da tensão de controle de base, $T_{R-3} + T_{R-4}$;
 T_{R-p} : Tempo de pico ou duração da tensão de controle de pico, $T_{R-1} + T_{R-2}$;
 T_s : Tempo que a gota demora para ser separada;
 $u_{(t)}$: Tensão instantânea do processo de soldagem;
 U_a : Tensão devido ao ânodo;
 U_g : Tensão devido ao arco elétrico (coluna ou plasma);
 U_c : Tensão devido ao cátodo;
 $U_a \cdot I$: Energia cinética dos elétrons que atingem a ânodo;
 U_{ef} : Tensão eficaz;
 $U_L = U_c + U_g + U_a$: Tensão do arco elétrico;
 U_m : Tensão média do processo;
 U_o : Tensão de circuito aberto da fonte de soldagem;
 $U_p = U_s + U_L$: Tensão entre o bico de contato e o metal base;
 U_s : Tensão devido à extensão do arame;
 U_T : Tensão devido à temperatura dos elétrons do ânodo;

U_{R_0} : Queda de tensão devido à resistência elétrica de contato entre o bico de contato e o arame;
 $u_{s(t)}$: Tensão devido à extensão de arame;
 $u_{r(t)}$: Tensão devido à resistência elétrica do cabo de alimentação mais a queda devido à resistência de contato entre o bico de contato e o arame, mais a queda devido ao metal base e terra. Essa queda $u_{r(t)}$ é baixa porque a medição da tensão do processo é feita tão próximo (do bico de contato e metal base) quanto possível na prática;
 $u_{arc(t)} = (u_{a(t)} + u_{L(t)} + u_{c(t)})$: Tensão devido ao ânodo, mais a queda devido ao arco elétrico (coluna ou plasma) é função de $L(t)$, mais a queda devido ao cátodo;
 V : Velocidade do jato de vapor em um ponto qualquer;
 v : Volume da gota destacada;
 $v_a(t)$: Volume instantâneo de fusão do arame;
 V_a : Volume médio de arame fundido por unidade de tempo;
 V_{pl} : Velocidade do jato de plasma;
 V_{R-b} : Tensão de controle de base da fonte de soldagem;
 V_{R-p} : Tensão de controle de pico da fonte de soldagem;
 $V_{R(t)}$: Tensão instantânea de controle da fonte de soldagem;
 $v_s(t)$: Velocidade instantânea de soldagem;
 V_s : Velocidade de soldagem;
 W : Velocidade de alimentação do arame;
 W_{fa} : Taxa média de fusão do arame;
 $W_{fa(t)}$: Taxa instantânea de fusão do arame;
 z : Distância na direção longitudinal do cilindro.

1.- INTRODUÇÃO

De uma maneira geral, nos processos MIG/MAG convencional e pulsado, um arame consumível funde, formando gotas de metal que logo são transferidas à poça de fusão, onde ocorre a solidificação, que afeta a forma final e a qualidade da solda /1/. Para poder controlar o processo de soldagem é necessário entender a influência das características elétricas, tais como a potência, a tensão, e a temperatura na formação e separação da gota.

Eagar /2/ concluiu, que a temperatura do arco elétrico não tem um efeito primário sobre o mesmo, no processo de soldagem. Essa conclusão se baseia no trabalho de Cobine *et al.* /3/ e Quigley *et al.* /4/, os quais demonstraram que a principal parcela da energia transferida pelo arco elétrico ao ânodo é devida à corrente elétrica, enquanto que a convecção e radiação são responsáveis somente por uma pequena parte da energia transferida ao metal base. As conclusões desses estudos mostram a importância de se analisar as características elétricas no processo de soldagem ao arco elétrico. Alguns trabalhos foram feitos para determinar a característica tensão-corrente do processo MIG/MAG convencional. Jackson /5/, por exemplo, determinou a característica de saída tensão-corrente da fonte, para o processo MIG/MAG convencional, utilizando arame de aço ao carbono e vários tipos de gases de proteção.

Entre as características elétricas, o efeito da dinâmica da fonte é muito importante, no processo MIG/MAG convencional, e tem sido assunto de extenso estudo, principalmente para os modos de transferência de massa por curto-circuito e aerossol. No entanto, têm recebido relativamente pouca atenção até o momento o processo MIG/MAG pulsado onde a transferência de massa pode ser controlada de forma bastante precisa, aplicando pulsos periódicos de corrente.

A transferência de massa controlada no processo MIG/MAG pulsado apresenta algumas vantagens em relação ao convencional, as quais são:

- .- Com baixos valores de corrente média de soldagem (< 100 A) é possível se obter transferência axial-projetado;
- .- Menor energia de aporte em relação ao convencional com modo aerossol. Essa redução de energia diminui a distorção da junta soldada;
- .- Redução da zona afetada pelo calor (ZAC);
- .- Precisão no controle da poça de fusão em todas as posições de soldagem, sendo essa facilidade devido ao desdobramento da corrente de soldagem contínua do convencional em níveis alto e baixo, em função do tempo do processo pulsado;
- .- Capacidade de realizar cordões de solda em chapas finas (< 6 mm);

.- O efeito da variação da corrente de soldagem pode produzir agitação da poça de fusão, minimizando a ocorrência de porosidade;

.- Enquanto que no processo convencional é praticamente impossível realizar soldas sobrecabeça, com o modo aerossol, no processo pulsado é possível realizar com maior facilidade.

No processo MIG/MAG pulsado, o modo de transferência de massa desejado é o axial-projetado, onde as gotas são destacadas como se fossem projéteis com diâmetro semelhante ao do arame utilizado. As gotas podem ser destacadas durante a aplicação do pulso de corrente ou quando aplicado a corrente base, dependendo do tipo e material do arame empregado.

As variações da transferência de massa afetam consideravelmente as características de fusão do cordão de solda, pois têm implicações metalúrgicas, com consequência sobre as propriedades mecânicas da junta soldada.

Na maioria dos estudos realizados até o presente com o processo MIG/MAG pulsado, foi utilizada a forma de onda retangular, sendo a determinação da taxa de fusão do arame dada em função das correntes média e eficaz, e da extensão do arame.

No processo MIG/MAG pulsado, muito pouco foi realizado no sentido de se estudar, caracterizar e quantificar os possíveis efeitos das diferentes formas de onda sobre as características de fusão.

Até o presente, não foram apresentadas metodologias aceitáveis para a determinação da potência e energia fornecida pela fonte, quando são utilizadas diferentes formas de onda.

O presente trabalho visa estudar - enfocando sob o aspecto teórico/prático - as características elétricas do processo MIG/MAG pulsado, utilizando diversas formas de onda sobre as características de fusão.

Portanto, os objetivos específicos do presente trabalho são:

(I) Apresentar uma análise teórica de fórmulas matemáticas, utilizando conceitos de eletricidade, necessárias na determinação da corrente média de soldagem, potência média do sistema, energia média de soldagem, taxa média de fusão do arame, e outras, úteis para o processo MIG/MAG pulsado em particular, e aplicável para qualquer forma de onda.

(II) Comparar os efeitos de algumas formas de onda de tensão de controle, podendo a mesma ser retangular, trapezoidal, triangular, dente de serra, e outras, sobre a corrente média de soldagem, realizando cordões de solda sobre a superfície livre de chapas ("bead-on-plate"), na

posição plana, utilizando arame AWS ER70 S-6 com 1,2 mm de diâmetro, e gás de proteção Ar + 4% CO₂.

(III) Selecionar três formas diferentes de onda de tensão de controle - estudando-as individualmente e em conjunto com os resultados obtidos dos cordões de solda “bead-on-plate” - para analisar seus efeitos sobre as características de fusão do processo, realizando cordões de solda em junta de filete, posição plana, utilizando arame ER70 S-6 com 1,2 mm de diâmetro, e gás de proteção Ar + 4% CO₂.

(IV) Apresentar uma análise teórico/prática das características de fusão do processo, utilizando as fórmulas desenvolvidas (taxa média de fusão do arame, eficiências de fusão do arame, consumível, metal base, processo, e outros) em conjunto com os resultados experimentais obtidos dos cordões de solda “bead-on-plate” e filete, em função dos parâmetros da onda na saída da fonte de soldagem.

2.- PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG CONVENCIONAL

2.1.- Generalidades

No processo de soldagem MIG/MAG há formação de um arco elétrico entre o metal base e o arame (eletrodo) nu consumível, continuamente alimentado. A poça de fusão formada é protegida por um gás, ou mistura de gases, podendo ser inerte ou oxidante. Ilustra-se os processos de soldagem MIG/MAG convencional e pulsado na Fig.1.

Geralmente, a fonte de soldagem empregada para a realização da solda é de corrente contínua, e a polaridade do eletrodo é positiva (CCEP), para a maioria das aplicações.

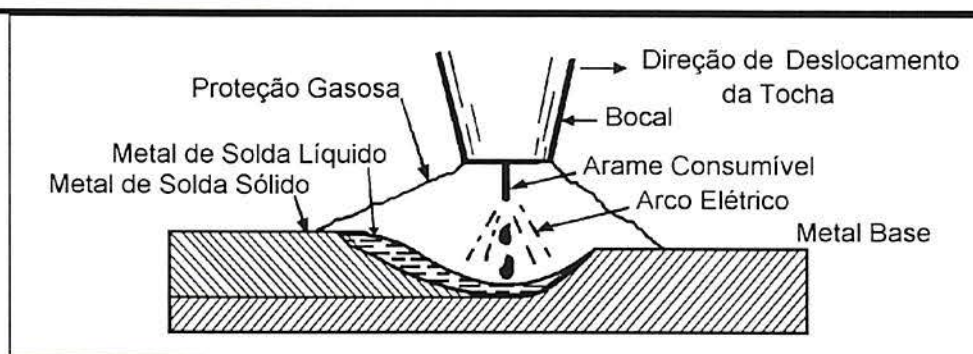


Fig.1: Processo de soldagem MIG/MAG.

2.2- Tipos de Fontes de Energia

As fontes de soldagem segundo suas características de saída tensão - corrente (Fig.2), classificam-se em fontes de:

- ◆ Tensão constante;
- ◆◆ Corrente constante.

◆ Se a característica de saída da fonte de soldagem for plana (tensão quase constante, Fig.2(a)), para uma pequena variação na tensão de saída (ΔU) ocorre uma grande variação na corrente de soldagem (ΔI).

Em operações de soldagem manual, existe variação inerente ao comprimento do arco elétrico, ao qual corresponde uma variação na tensão. Esse tipo de fonte é utilizado no processo MIG/MAG, para soldagens mecanizadas, automáticas e semi-automáticas, onde o arame consumível é continuamente alimentado no arco elétrico. Uma vez estabelecidos os parâmetros de soldagem, o sistema de alimentação de arame mantém constante sua velocidade ao longo do processo de soldagem. Quando ocorrer alguma alteração no comprimento do arco elétrico, por exemplo um aumento no comprimento, a tensão de saída aumenta, e simultaneamente a corrente de

soldagem tende a diminuir fazendo com que a taxa de fusão do arame diminua, com isso se reestabelecerá o comprimento inicial.

Em fontes com característica de saída do tipo tensão constante, o comprimento do arco elétrico é auto-ajustado, significando que pequenas flutuações na tensão do arco conduzem a significativas variações na corrente de soldagem. Isto, por sua vez, pode afetar o modo de transferência de massa, que tem uma função física importante na característica do processo.

♦♦ Em uma fonte de soldagem com características de saída tombantes (corrente de soldagem quase constante no intervalo de trabalho, Fig.2(b)), para uma grande flutuação na tensão de saída (ΔU) ocorre uma pequena variação na corrente de soldagem (ΔI). Em operações de soldagem manual, o comprimento do arco elétrico (tensão de saída) pode variar bastante, já a corrente de soldagem será alterada muito pouco. Portanto, esse tipo de fonte de soldagem é recomendado para processos de soldagem manual.

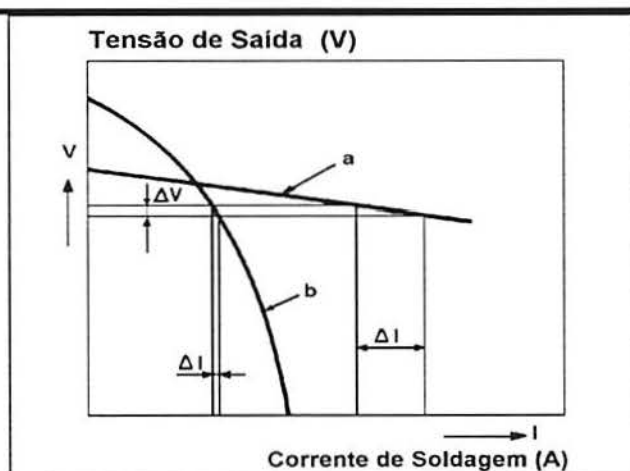


Fig.2: Características de saída tensão - corrente de duas diferentes fontes de soldagem. **a** - Tipo tensão constante; **b** - Tipo corrente constante.

2.3.- Fatores que Afetam o Modo de Transferência

As principais variáveis operacionais que afetam o modo de transferência de massa, do arame à poça de fusão são:

- .- Corrente de soldagem;
- .- Composição do gás de proteção;
- .- Extensão do arame;
- .- Pressão do ambiente;
- .- Elementos ativos no revestimento do eletrodo (arame);
- .- Polaridade do eletrodo;

.- Material do arame.

Entre as variáveis acima citadas, a corrente de soldagem é uma das mais importantes, sendo de fácil ajuste para obter o modo de transferência desejado.

O modo de transferência globular ocorre com baixos valores de corrente de soldagem. No entanto, o modo de transferência aerossol ocorre para valores de corrente relativamente altos. Empregando baixos valores de corrente de soldagem, se obtém o modo projetado, onde o diâmetro da gota é aproximadamente igual ao do arame. Aumentando o valor da corrente de soldagem, o modo de transferência passa de projetado para contínuo. Para valores ainda maiores, o modo passa de contínuo para rotativo.

Os modos projetado, contínuo e rotativo ocorrem somente quando a composição do gás de proteção utilizado é à base de argônio, e o metal de adição aço ao carbono.

Quando as misturas dos gases empregados para a proteção são CO_2 , He, e N_2 em geral, tem-se o modo globular repellido /6-8/, estando ausentes os modos contínuo e rotativo. Entretanto, para misturas de Ar + CO_2 , a taxa de transferência da gota aumenta com o incremento de Ar na composição da mistura:

- Considerando o efeito da composição do gás de proteção, o intervalo de corrente para o modo projetado, aumenta consideravelmente adicionando-se CO_2 ou He no Ar.

- Utilizando comprimentos menores na extensão do arame, e diâmetros maiores, o valor da corrente de transição aumenta /9/. Amsom /10/ observou que, aumentando a pressão, o valor da corrente de transição também aumentava. Porém, Perlman *et al.* /11/, observaram que a transferência aerossol é irregular, e a tensão do arco flutua quando a pressão alcança 5 atm.

2.3.1- Classificação do Modo de Transferência

A forma pela qual o metal fundido é destacado da ponta do arame à poça de fusão, determina a quantidade de salpico produzido; a estabilidade do arco elétrico do processo; a possibilidade das soldas serem realizadas em diversas posições; a aparência da superfície do cordão de solda; e a qualidade do metal de solda depositado. A característica de transferência do metal de adição depende amplamente da composição do gás de proteção, da composição química do arame e dos parâmetros elétricos /12-14/.

A classificação do modo de transferência do metal no arco elétrico (Fig.3), foi proposta pelo International Institute of Welding (IIW), em estudos realizados /13/ usando filmagem de alta velocidade no processo MIG/MAG convencional. A mais simples classificação foi feita dividindo os modos de transferência em dois principais grupos e em vários subgrupos, como se mostra na Tabela 1.

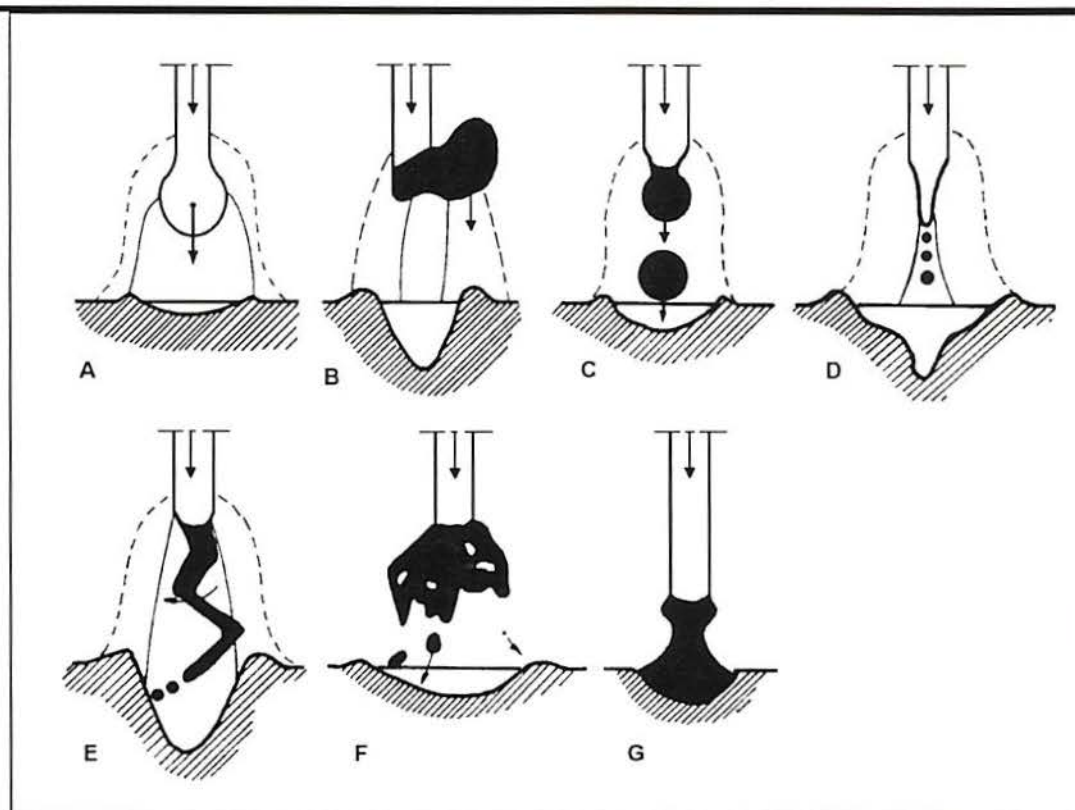


Fig.3: Classificação do modo de transferência de massa segundo IIV.

Tab.1: Classificação dos modos de transferência de Massa, Segundo IIV:

Tipo de Transferência	Processo de Soldagem
a.- VÔO LIVRE	
1.- Globular	
1.1.- Gota (Fig.3A)	MIG convencional, com gás inerte e baixa densidade de corrente ($< 110 \text{ A/mm}^2$)
1.2.- Repelido (Fig.3B)	MAG convencional, com gás ativo
2.- Aerossol	
2.1.- Projetado (Fig.3C)	MIG/MAG convencional, com baixa densidade de corrente ($> 110 \text{ A/mm}^2$)
2.2.- Contínuo (Fig.3D)	MIG/MAG convencional, com média densidade de corrente ($> 220 \text{ A/mm}^2$)
2.3.- Rotativo (Fig.3E)	MIG/MAG convencional, com alta densidade de corrente ($> 310 \text{ A/mm}^2$)
3.- Explosivo (Fig.3F)	Eletrodo revestido
b.- PONTE	
Curto-Circuito (Fig.3G)	Eletrodo revestido; MIG/MAG convencional com baixa densidade de corrente ($< 110 \text{ A/mm}^2$)

Na atualidade, a maioria das fontes de energia são controladas por dispositivos eletrônicos, melhorando o controle da transferência de massa do eletrodo à poça de fusão, para uma determinada velocidade de alimentação de arame.

Quando há variação da corrente de soldagem em função do tempo, isto é, aplicando pulsos periódicos de corrente, é possível controlar o modo de transferência do metal de forma satisfatória, e dois modos podem ser obtidos /12/:

- Axial-projetado;
- Curto-circuito.

Devido à necessidade de se obter o modo de transferência axial-projetado com valores de corrente média inferiores ao nível crítico do processo convencional, foi introduzido o MIG/MAG com pulsos de corrente.

2.4.- Efeito dos Parâmetros de Soldagem sobre a Transição Globular-Aerossol

Lesnewich /9,15/, estudou o fenômeno de transferência de massa mediante a variação dos seguintes parâmetros: corrente de soldagem, extensão e diâmetro do arame, polaridade do eletrodo, e arame aço ao carbono. O mesmo observou a existência de uma abrupta mudança na frequência de transferência da gota, para um pequeno intervalo de corrente, denominado corrente de transição. O valor da corrente de soldagem de transição aumenta com o incremento do diâmetro e diminuição da extensão do arame.

O gás de proteção é necessário para proteger a gota e a poça de fusão da contaminação atmosférica. Porém, o mesmo influi significativamente, também, sobre a estabilidade do arco, o fenômeno de transferência, e a geometria do cordão de solda.

2.4.1.- Efeitos da Corrente de Soldagem e da Composição do Gás de Proteção sobre a Frequência da Gota

Rhee *et al.* /16/, observaram gotas esféricas de tamanho grande suspensas na ponta do arame, resultando o modo globular, e sem formação do pescoço, empregando argônio como gás de proteção, metal de adição aço ao carbono com 1,6 mm de diâmetro.

Quando a corrente de soldagem atinge o valor de transição, a frequência aumenta subitamente (Fig.4), e o arco geralmente é muito estável nessa região, sendo o modo de transferência projetado. Uma vez ultrapassado o valor de corrente de transição, o modo de transferência passa a contínuo.

É muito significativa a influência do gás de proteção sobre o modo de transferência. Rhee *et al.* /16/ empregando dióxido de carbono (CO_2), e valores de corrente de 150 até 380 A, obtiveram o modo globular. Com corrente de soldagem de 350 A, a frequência da gota oscila de 4 a 8 por segundo. A repulsão da gota deve-se aos efeitos da força eletromagnética, e à força da vaporização dos elementos de liga, bem como seus óxidos, resultando o salpico. O comportamento do hélio é similar ao CO_2 , e, com frequência da gota ligeiramente superior, provavelmente devido à alta energia de ionização. Apesar da energia de ionização do CO_2 ser menor do que a do He, a obtenção da transferência aerossol é muito difícil. O efeito do Ar de pureza comercial sobre a frequência da gota é bem maior do que para o He ou CO_2 , podendo isto ser devido ao seu baixo potencial de ionização.

Empregando-se a mistura Ar + CO_2 , a corrente de transição é maior do que para o Ar (Fig.4). Um incremento na proporção de CO_2 aumenta a energia potencial e, conseqüentemente, a densidade de corrente de soldagem. Quando o conteúdo de CO_2 no Ar atinge 5%, o valor da corrente de transição é mínimo, ocorrendo como conseqüência da redução da tensão superficial, devido à oxidação /17/.

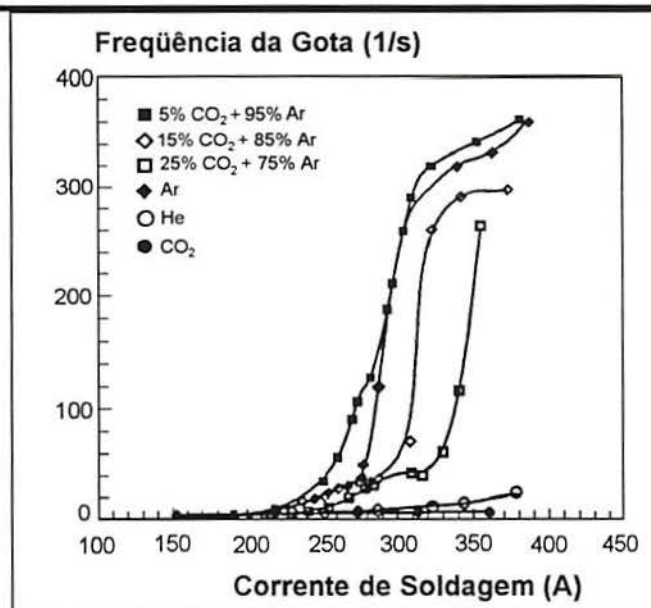


Fig.4: Influência da composição do gás de proteção sobre a frequência da gota destacada /16/.

2.4.2.- Efeito da Extensão do Arame

A extensão do arame tem uma função muito importante sobre o modo de transferência, sendo que o seu aumento resulta na redução da corrente de transição (Fig.5). Em geral, para um aumento na extensão do arame, corresponde um incremento significativo do efeito Joule sobre a

freqüência da gota destacada. No modo globular e aerossol isto é insignificante, mas influi fortemente no valor da corrente de transição /16/.

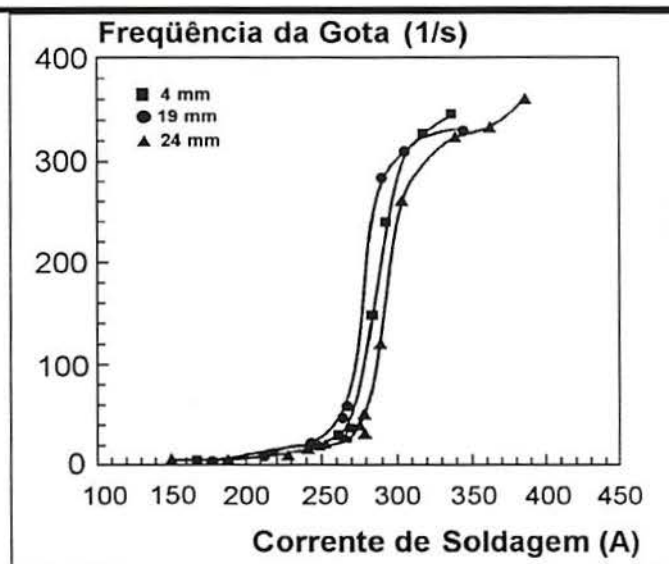


Fig.5: Efeito da extensão do arame (s) sobre a freqüência da gota destacada /16/.

3.- TEORIAS DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA

Devido à influência de vários fatores sobre os modos de transferência de massa, modelos teóricos foram propostos para explicar o fenômeno, sendo os mesmos pouco abrangentes na aplicação, e com limitado sucesso.

Existem dois modelos teóricos de transferência de massa bem diferenciados, ou seja:

- ♦ Teoria de Balanço das Forças Estáticas /17-21/;
- ♦ Teoria da Instabilidade (“Pinch”) /22-24/.

Além dos modelos acima citado, há mais duas teorias que foram propostas, para explicar a transição do modo de transferência, as quais são:

- ♦ Teoria da Força do Plasma /25/;
- ♦ Teoria da Velocidade Crítica /26/.

3.1.- Teoria de Balanço das Forças Estáticas

A frequência da gota destacada e o modo de transferência de massa à poça de fusão são de muita importância no processo de soldagem.

Da análise dos diversos processos de soldagem disponíveis, foram constatados que existem vários modos de transferência, dependendo das condições específicas de soldagem, tais como: densidade de corrente; polaridade do eletrodo; composição do gás de proteção; tensão do arco; material do eletrodo; etc.

As forças atuantes sobre a gota do metal líquido dependem de vários fatores, sendo, na prática, difíceis de serem quantificados. Por exemplo, a tensão superficial é função da temperatura, composição e forma da gota. Por sua vez, a forma da gota se modifica conforme vai evoluindo, resultando na alteração do valor da tensão superficial. Idênticas mudanças ocorrem com as outras forças atuantes, sendo, em geral, o fenômeno função do tempo.

Vários autores /17-21/ estudaram a separação da gota, fazendo um balanço de forças estáticas, como é mostrado na Fig.6, para logo predizer seu comportamento. No postulado da teoria de balanço das forças estáticas, a gota se destaca desde o arame, quando as forças estáticas de separação superam às de retenção. Para um instante determinado, a equação de equilíbrio das forças é a seguinte:

$$F_s + F_v = F_g + F_d + F_e \quad [3.1]$$

Onde:

F_s = Força devido à tensão superficial;

F_v = Força devido ao vapor da superfície da gota do metal líquido;

F_g = Força devido à aceleração da gravidade;

F_d = Força de arraste devido ao fluxo do gás de proteção;

F_e = Força eletromagnética.

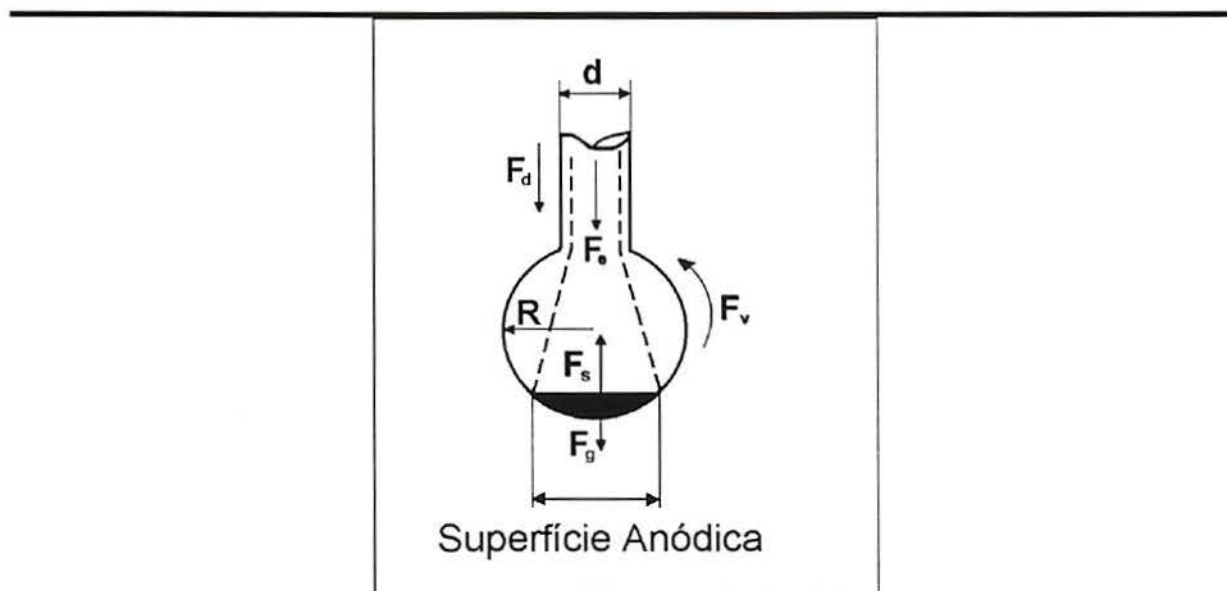


Fig.6: Forças atuantes sobre a gota fundida na ponta do eletrodo /17-21/.

3.1.1.- Força Devido à Tensão Superficial

Nos processos de soldagem onde existe fusão, a força devido à tensão superficial tem um efeito muito importante sobre a transferência de massa desde o eletrodo para a peça, na formação da poça de fusão, e na estabilidade do arco. No entanto, nos processos de brasagem e solda branda, a tensão superficial é responsável pelo molhamento e enchimento da junta.

No interior de um corpo líquido ou sólido, a força líquida sobre qualquer átomo ou molécula é relativamente pequena. Quando estes átomos se encontram rodeados por outros átomos, que exercem forças em todas as direções, existe uma pequena força resultante. Na superfície, há uma força resultante de atração, sendo função da densidade molecular, e é maior para os líquidos do que para o vapor. A tendência do líquido é de se contrair ao volume mínimo possível, de forma esférica, se não tiver ação de força externa.

O trabalho necessário para deslocar uma molécula do interior do líquido para a superfície, em sentido contrário à força de atração, corresponde à energia livre de superfície γ (J/m²). Considerando-se um estado de tensão, a tensão superficial é a força que atua ao longo da unidade de comprimento da superfície líquida, medido em (N/m).

Na Fig.7, pode ser vista a coexistência de três fases em contato, tensões superficiais e ângulos de interseção entre as fases, com o sistema em equilíbrio.

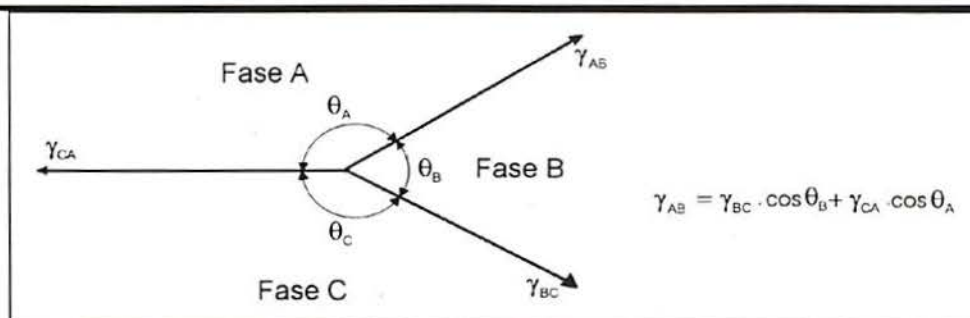


Fig.7: Forças interfaciais entre as três fases em equilíbrio /17/.

Para uma gota líquida sobre uma superfície sólida plana -gota sésil- (Fig.8), estando o sistema em equilíbrio, é possível calcular a tensão superficial usando a seguinte equação:

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cdot \cos \theta \quad [3.2]$$

Onde:

γ_{sv} , γ_{sl} , γ_{lv} = Energia livre por unidade de área da interface.

θ = Ângulo da interface líquido-sólido.

Quando é requerido um completo molhamento, situação desejada para os processos de brasagem e solda branda, a equação deve satisfazer:

$$\gamma_{sv} \geq \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \quad [3.3]$$

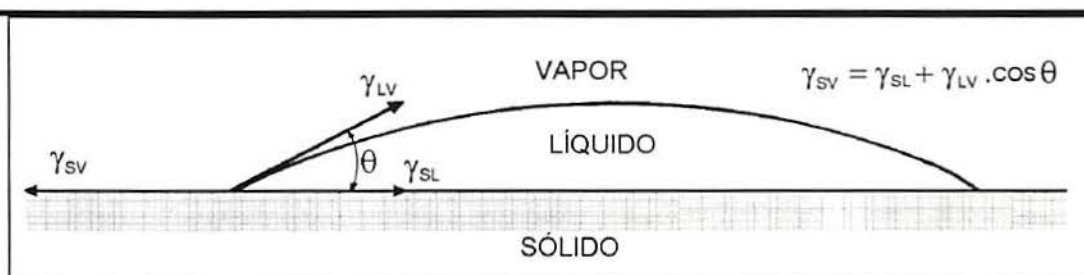


Fig.8: Forças interfaciais de uma gota sésil sobre uma superfície sólida plana /17/.

Na Fig.8, supõe-se que não há força externa atuando sobre a gota. No processo de soldagem, a forma do reforço do cordão de solda será determinado por:

- ♦ Largura da poça de fusão;
- ♦ Volume em excesso adicionado à poça de fusão;
- ♦ Pressão hidrostática sobre o metal fundido no reforço;
- ♦ Presença de fluxo.

A força devido à tensão superficial é um fator muito importante no modo de transferência de massa. Vários fatores influem sobre a tensão superficial, entre eles: composição e

homogeneidade da gota; temperatura da gota; gradiente de temperatura superficial; composição do gás de proteção, e forma da gota.

Lancaster /17/ determinou, a relação empírica:

$$F_s = \frac{M \cdot g}{f\left(\frac{r}{Ca}\right)} \quad [3.4]$$

$$\text{Com: } f\left(\frac{r}{Ca}\right) = 1 - 0,4 \cdot \left(\frac{r}{Ca}\right) \quad [3.4a]$$

$$Ca = \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma}{\rho_m \cdot g}} \quad [3.4b]$$

Onde:

M = massa da gota fundida e destacada;

g = aceleração da gravidade;

r = raio do arame;

Ca = constante de capilaridade;

ρ_m = densidade da gota fundida e destacada.

3.1.2.- Força Devido ao Jato de Vapor Metálico

Para elevados valores de densidade de corrente, a tendência é de ocorrer, na superfície da gota do metal líquido que está em contato direto com a raiz do arco, aceleração térmica de partículas de vapor no jato de plasma, resultando em uma força oposta à separação da gota.

Essa força de vaporização pode ser calculada usando a seguinte equação:

$$F_v = \int m_a \cdot V \cdot dS \quad [3.5]$$

Onde:

m_a = Taxa de fluxo de massa por unidade de superfície;

V = Velocidade do jato de vapor em um ponto qualquer;

S = Área de contato.

Em geral, a força devido ao jato de vapor metálico (F_v) torna-se significativa só para altos valores de densidade de corrente de soldagem.

3.1.3.- Força Devido à Aceleração da Gravidade

A importância da força devido à aceleração da gravidade pode ser determinada observando a diferença no comportamento na separação da gota, em soldas realizadas nas posições planas e sobrecabeça. A expressão da força é a seguinte:

$$F_g = M \cdot g_z \quad [3.6]$$

Onde:

M = Massa da gota fundida;

g_z = Componente vertical da aceleração devido à gravidade. Por exemplo: $g_z = 9,81 \cdot \cos\psi$;

onde ψ é o ângulo entre a vertical e o eixo do arco.

Se a geometria da gota for esférica, a massa da mesma pode ser calculada por:

$$M = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \rho_m \quad [3.7]$$

Onde:

R = raio da gota;

ρ_m = densidade da gota fundida.

Para baixos valores da corrente de soldagem, a força devido à gravidade é a predominante, e o efeito da força eletromagnética é desprezível, obtendo-se, em geral, o modo de transferência globular. F_g atua como força de separação quando a deposição é realizada na posição plana.

3.1.4.- Força de Arraste

A força de arraste sobre um corpo esférico devido ao fluxo de gás de proteção, na direção do fluxo, pode ser escrita /27/:

$$F_d = \frac{\pi}{2} \cdot V_{pt}^2 \cdot \rho_{pt} \cdot R^2 \cdot C_d \quad [3.8]$$

Onde:

V_{pt} = Velocidade do jato de plasma;

ρ_{pt} = Densidade do plasma;

η = Viscosidade;

C_{de} = coeficiente de arraste para uma esfera

R = Raio da gota imersa no plasma;

C_d = Coeficiente de arraste, o qual é função do número de Reynolds:

$$Re = \frac{2 \cdot V_{pt}^2 \cdot R \cdot \rho_{pt}}{\eta} \quad [3.8a]$$

Para corpo esférico a relação entre C_d e Re está bem determinada. O valor do coeficiente de arraste (C_d) para uma esfera é C_{de} , multiplicado pelo fator $[1 - d^2/2 \cdot R^2]$, onde " d " é o diâmetro do eletrodo /27/. A expressão [3.8] modificada, foi utilizada por Needham *et al.* /25/, transformando-se em:

$$F_d = C_{de} \cdot \left(1 - \frac{d^2}{2 \cdot R^2}\right) \cdot \frac{\pi}{2} \cdot V_{pl}^2 \cdot \rho_{pl} \cdot R^2 \cdot \quad [3.9]$$

A força de arraste exercida sobre o metal líquido é devido ao fluxo de gás de proteção, o qual depende da velocidade, composição do gás de proteção, e também do tamanho da gota.

A força de arraste F_d será maior quando o tamanho da gota aumenta, isto é, para baixos valores de correntes de soldagem.

3.1.5.- Força Eletromagnética

A área anódica formada é a região por onde os elétrons entram na gota, podendo não ser igual ao diâmetro do arame. Em consequência, a corrente pode divergir ou convergir dentro da gota. Portanto, a corrente elétrica que circula através da gota (I_g); não é necessariamente igual aos elétrons que entram no arame /19,21,25/. A força de Lorentz $\vec{f}_L = \vec{j} \times \vec{B}$, por unidade de volume do metal líquido é calculada considerando o cilindro simétrico de coordenada (r, φ, z) , ilustrada na Fig.9, temos:

$$(f_L)_r = -j_z \cdot B_\varphi \quad [3.10]$$

$$(f_L)_z = +j_r \cdot B_\varphi \quad [3.11]$$

Onde:

j = Densidade de corrente;

B = Indução magnética.

Quando a gota é esférica, com distribuição espacial homogênea de j_z , /19, 21/, a força de Lorentz (F_L) sobre a gota é a integral de $(f_L)_z$ em todo o volume,

$$F_L = \frac{\mu_0 \cdot I_g^2}{4 \cdot \pi} \cdot G(\alpha, \beta) \quad [3.12]$$

Onde:

$$G(\alpha, \beta) = \ln\left(\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}\right) - \frac{1}{4} + \frac{1}{1 - \cos \alpha} + \frac{2}{(1 - \cos \alpha)^2} \cdot \ln\left(\frac{2}{1 - \cos \alpha}\right) \quad [3.12a]$$

Com:

μ_0 = Permeabilidade do vácuo;

α e β = São os ângulos mostrados na Fig.9;

I_g = Corrente que circula através da gota; não é necessariamente igual aos elétrons que entram no arame.

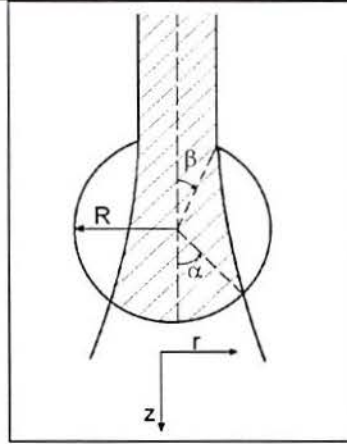


Fig.9: Ilustração da coordenada (z,r) para discussão da força $f_L = \vec{j} \times \vec{B}$.

Ambos ângulos (α e β) aumentam com o incremento no valor da corrente I_g , porque o raio da gota (R) diminui e o diâmetro da área anódica aumenta.

$$f_2 = \left[\ln \frac{R \cdot \sin \varphi}{r} - \frac{1}{4} - \frac{1}{1 - \cos \varphi} + \frac{2}{(1 - \cos \varphi)^2} \cdot \ln \frac{2}{1 + \cos \varphi} \right] \quad [3.12b]$$

O fator geométrico f_2 , equivalente a $G(\alpha, \beta)$ da equação [3.12], foi representado por Kim *et al.* /28/, em função do ângulo de condução “ φ ”, mostrado na Fig.10.

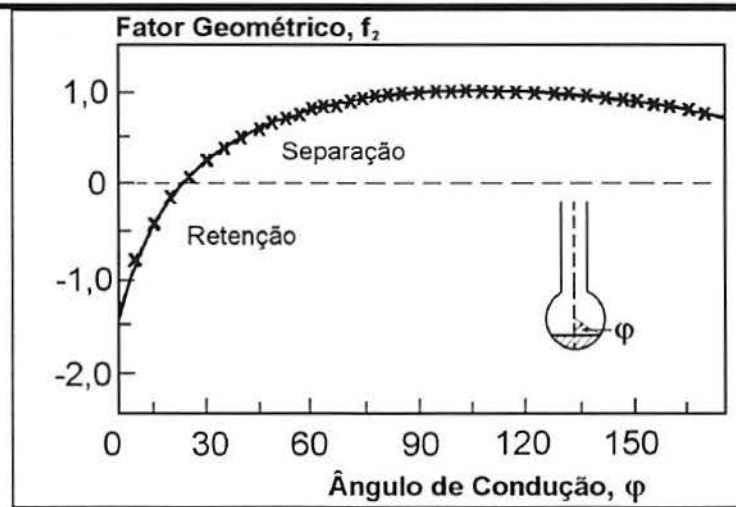


Fig.10: Variação do fator f_2 em função do valor do ângulo de condução da corrente de soldagem /28/.

Quando a zona de condução da corrente é pequena, tal que as linhas converjam, f_2 se torna negativo, e a força eletromagnética resulta negativa, obtendo-se uma força de repulsão. Porém, se a zona de condução é suficientemente grande para que as linhas de corrente

divirjam, f_2 tem valor positivo, e a força eletromagnética se transforma em força útil para destacar a gota.

O plasma, embaixo da ponta do eletrodo, é dividido em duas regiões, com diferentes propriedades físicas [29,30]. A primeira região é um cilindro estreito ao redor do eixo, com diâmetro de cerca de 2 mm, onde o plasma contém vapor metálico (Fe , Mn), cuja temperatura (T_m) é próxima de 7000 °C e a densidade dos elétrons, n_e , é 10^{22} m^{-3} [29]. A região externa do plasma contém unicamente Ar, com $T_m \approx 13000 \text{ °C}$, e $n_e = 10^{23} \text{ m}^{-3}$ [30], maiores que na primeira região.

As correntes do plasma (I_{pl}) e do arame (I_w) são de magnitudes comparáveis. A densidade de corrente no arame é $\approx 75 \text{ A/mm}^2$, maior do que a densidade do plasma ($\approx 1 \text{ A/mm}^2$). Ton [29] demonstrou, que o plasma no metal menos quente conduz somente uma parte da corrente total do arco. Então, a corrente, ao entrar no plasma, deve divergir fortemente. Em consequência, a corrente do arco embaixo da ponta do arame é a soma da I_{pl} (que possui distribuição espacial independente da coordenada vertical) à corrente que circula no arame I_w , divergente. As densidades dessas correntes são j_{pl} e j_w , respectivamente.

Waszink *et al.* [20], concluíram que a força eletromagnética pode ser interpretada como força de Lorentz.

3.1.6.- Limitações da Teoria de Balanço das Forças Estáticas

Waszink *et al.* [31] estudaram as magnitudes das forças que atuam sobre a separação da gota e obtiveram resultados experimentais concordantes com a teoria de balanço das forças estáticas, sendo as mesmas válidas somente para o modo de transferência globular. Entretanto, para o modo aerossol, os valores teóricos desviam-se significativamente dos obtidos no experimento.

Segundo verificações realizadas por Kim *et al.* [28], a teoria de balanço das forças estáticas apresenta algumas limitações e dificuldades para explicar o fenômeno de transferência no processo MIG/MAG convencional, pois:

- ◆ O efeito da extensão do arame sobre o modo de transferência não é considerado na teoria de balanço das forças estáticas.
- ◆ Na análise da teoria de transferência, foram usados arame de aço ao carbono e gás de proteção à base de Ar. Outras combinações do sistema produzem o modo globular repelido, não podendo ser explicado nesta teoria.

3.2.- Teoria da Instabilidade (“Pinch”)

A teoria da instabilidade (“pinch”) foi estudada e desenvolvida a partir do modelo de instabilidade Lord Rayleigh /32/, usando uma coluna líquida, onde um distúrbio do próprio comprimento de onda no líquido tende a causar instabilidade na coluna. Se a perturbação aplicada ao cilindro é na direção “z” e “ξ”, o raio (r_i) decresce, e a superfície é dado por:

$$r_i = r + \varepsilon \cdot \cos \left[-m_i \cdot \xi + \left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \right) \cdot z \right] \quad [3.13]$$

Onde:

λ = Comprimento da onda de instabilidade;

ε = Amplitude da perturbação;

r = Raio do cilindro, para o arame é igual ao raio do eletrodo;

m_i = Fator que considera a deformação da seção transversal em relação à original, podendo ser “0”, “1” e “2”;

z = Distância na direção longitudinal do cilindro;

f_p = Frequência da perturbação da coluna líquida;

ξ = Fator que considera a deformação da seção transversal em relação à original.

A equação da superfície tem a forma genérica:

$$r_i = f(\xi; z) \quad [3.13a]$$

O efeito do termo “ξ” é para considerar a deformação da seção transversal em relação à original, que tem forma de circunferência.

$$f_p = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} \quad 3.14]$$

Quando $m_i = 0$, a frequência máxima é $f_p = 0,696$, e o tamanho da gota mais provável é duas vezes o diâmetro do coluna líquida.

Na soldagem MIG/MAG, uma força magnética atua sobre o trecho do condutor que conduz a corrente de soldagem, e pode ser gerada de duas formas:

- 1.- Devido à interação da corrente de soldagem e um campo magnético aplicado externamente;
- 2.- Por interação da corrente de soldagem com seu próprio campo magnético.

A aplicação de um campo magnético externo tem apresentado utilidade na área de soldagem. Por exemplo: na deflexão do arco elétrico para melhorar a geometria do cordão ou evitar a falta de fusão, na diminuição da susceptibilidade de trinca de solidificação. No entanto,

a auto-indução gerada durante o processo de soldagem afeta o arco elétrico, produzindo sopro magnético. Outro efeito importante, é a interação local do metal líquido da ponta do eletrodo com seu próprio arco e a poça de fusão, afetando o cordão de solda resultante.

A teoria da instabilidade postula, para a transferência do metal, que a força devido ao efeito “pinch” sobre a coluna metal fundido é provocada por auto-indução, sendo que a força eletromagnética facilita o rompimento dessa coluna líquida para se transformar em gota.

Quando $m_i = 0$, a solução analítica aproximada do comprimento crítico da onda de instabilidade é /17,22/:

$$\lambda_c = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{\left[1 + \frac{\mu_o \cdot I^2}{2 \cdot \pi^2 \cdot r \cdot \gamma} \right]^{1/2}} \quad [3.15]$$

Onde:

λ_c = Comprimento crítico da onda de instabilidade;

γ = Energia livre de superfície;

I = Corrente elétrica de soldagem.

Na equação [3.15], implica que λ_c , na presença da corrente elétrica de soldagem, se tornará instável em um intervalo reduzido. Uma coluna de diâmetro menor se romperá mais facilmente do que uma de diâmetro maior.

Anno /33/ obteve a frequência para um jato viscoso com mudança na carga superficial, mostrando que a viscosidade e a superfície carregada têm efeito estabilizador. Porém, Allum /23,24/ demonstrou que o efeito da viscosidade é desprezível no metal líquido, mas o efeito estabilizador da superfície carregada é significativo para baixos valores de corrente de soldagem.

A teoria de instabilidade (“pinch”) sofre problemas semelhantes à teoria de balanço das forças estáticas, sendo difícil explicar o efeito da extensão do arame, e modo globular repellido /28/.

3.3.- Outras Teorias

Ao utilizar arame de aço ao carbono com gás de proteção a base de Ar, a transição globular-aerossol ocorre em um intervalo de corrente muito estreito, de aproximadamente 10 A /9/.

Needham *et al.* /25/, aplicaram a teoria de balanço das forças estáticas e concluíram que a transição ocorre quando o plasma começa e exerce a força de arraste sobre a gota.

Em estudos recentes /28/, utilizando-se arame de aço ao carbono e gás de proteção Ar+2%O₂, concluiu-se que a transição do modo de transferência de globular a projetado é gradual. Da mesma forma, é gradual quando passa do modo projetado a contínuo.

Mediante a aplicação da teoria de balanço das forças estáticas, é possível prever o tamanho da gota no modo globular, porém, no modo aerossol desvia-se significativamente. A possível explicação se deve ao efeito de que a ponta do arame modifica sua geometria de cilíndrica para cone truncado.

A teoria de instabilidade “pinch”, não considera as alterações que ocorrem na extensão do arame e na mistura do gás de proteção, que são fatores muito importantes no modo de transferência de massa. Kim *et al.* /28/, para poder explicar o efeito da extensão do arame, utilizaram a teoria de balanço das forças estáticas, considerando o calor total que entra no arame via calor de condensação dos elétrons, e calor devido ao efeito Joule, ou seja:

$$Q_{total} = \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{k \cdot T_e}{e} + U_a + \phi \right) \cdot I + \bar{\rho} \cdot \frac{s}{A} \cdot I^2 \quad [3.16]$$

Onde:

Q_{total} = Calor total que entra no arame;

A = Área transversal do arame (eletrodo);

I = Corrente de soldagem;

s = Extensão do arame, comprimento do eletrodo após o bico de contato;

U_a = Queda de tensão do ânodo;

$\bar{\rho}$ = Resistividade média da extensão do arame;

ϕ = Função trabalho da superfície do ânodo, ou a energia potencial convertida pelos elétrons quando penetram no ânodo;

$(2/3) \cdot k \cdot T_e$ = Queda de tensão devido ao aumento de temperatura produzido pelos elétrons que chegam ao ânodo;

A mudança na geometria, na ponta do arame, reduz o diâmetro efetivo da gota retida pelo pescoço, equação [3.4]. Então, reduzida a força de retenção se terá gotas de menores diâmetros.

4.- EFEITO DO MODO DE TRANSFERÊNCIA NO PROCESSO MIG/MAG CONVENCIONAL

As principais características do processo convencional são determinadas pelo modo de transferência de massa do arame à poça de fusão, através do arco elétrico.

Alterando o modo de transferência, é possível controlar o nível de salpico, taxa de geração de fumos, penetração, e posição de soldagem, entre outros.

4.1.- Salpico

O salpico, no processo MIG/MAG convencional, significa que material a mais é gasto, a superfície da peça é danificada e a qualidade da solda é reduzida, aumentando, assim, o custo de produção.

Quigley *et al.* /34/, concluíram que no modo de transferência globular, a temperatura é elevada, causando superaquecimento da gota, devido à permanência da mesma um tempo relativamente maior na coluna do arco elétrico. O superaquecimento causa ebulição da gota, ainda na ponta do arame. Esse fenômeno produz inevitavelmente o salpico, seja no modo de transferência globular como no contínuo. Fenômeno semelhante foi observado por Ma *et al.* /35/.

No modo de transferência projetado, a gota não atinge a temperatura de ebulição, conseqüentemente sua quantidade de calor é menor que na transferência globular e contínuo. Comparação feita para diferentes modos de transferência, mesma massa e idênticos materiais, sendo a quantidade de calor proporcional à temperatura, como mostra a Fig.11 /35/.

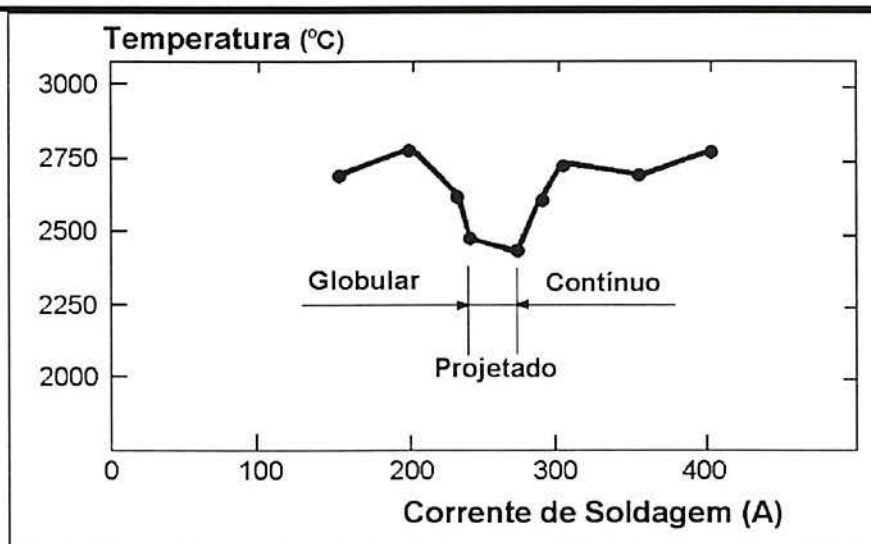


Fig.11: Quantidade de calor da gota (proporcional à temperatura) em função do modo de transferência de massa, A.- Globular; B.- Projetado; C.- Contínuo /35/.

4.2.- Taxa de Geração de Fumos

Heile *et al.* /36/, estudaram a influência dos parâmetros de soldagem no processo MIG/MAG convencional, sobre a taxa de geração de fumos [*TGF*], determinando os fatores significativos, que são: corrente de soldagem, tensão do arco, e composição do gás de proteção.

4.2.1.- Efeito da Corrente de Soldagem e Composição do Gás de Proteção sobre a TGF

A taxa de geração de fumos apresenta variação em função da corrente de soldagem e gás de proteção a base de Ar, com valores mínimos salientes no intervalo de corrente de 250 a 300 A, mantendo-se constante a tensão do arco ($\approx 28V$); consumível tipo ER70S-2 com diâmetro de 1,2 mm, com as seguintes misturas: Ar+5%O₂; Ar+2%O₂; Ar+2%CO₂, como mostrado na Fig.12. No entanto, usando os gases de proteção: Ar+25%CO₂ e CO₂, a *TGF* aumenta proporcionalmente segundo a corrente de soldagem, apresentando valores únicos de *TGF* para cada valor de corrente (Fig.13).

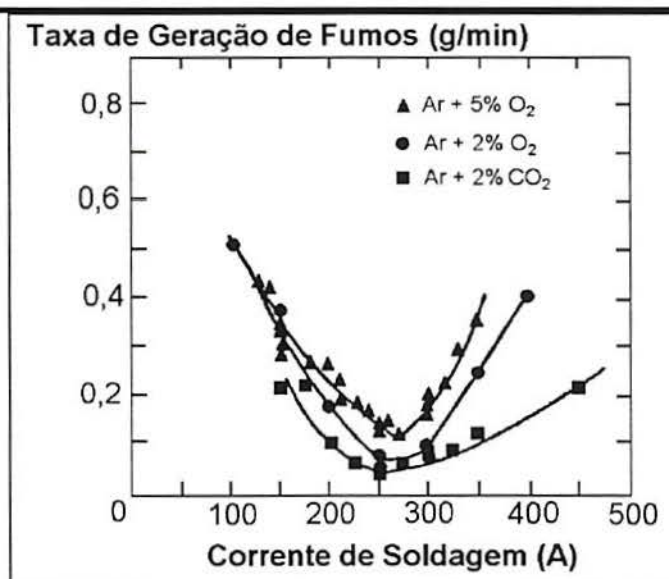


Fig.12: Efeito da composição do gás de proteção, no processo MIG/MAG convencional, sobre a taxa de geração de fumos /36/.

A taxa de geração de fumos é muito maior com gás CO₂ do que com misturas de gases a base de Ar, variando a corrente de soldagem. Isto se deve à natureza oxidante do gás e ao modo de transferência /36/, sendo produzido pelo metal que vaporiza, poluindo e podendo causar dano à saúde. As conclusões de Ma *et al.* /37/, são as mesmas de Heile *et al.* /36/, somente que os primeiros analisaram a taxa de geração de fumos em função do modo de transferência (Fig.14) e determinaram que, no modo de transferência projetado, a quantidade de calor da gota e a taxa de geração de fumos são mínimos.

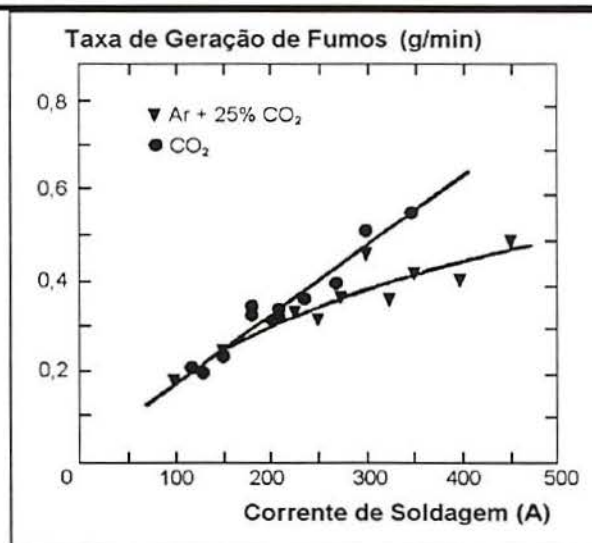


Fig.13: Efeito da composição do gás de proteção, Ar+25%CO₂ e CO₂, no processo MIG/MAG convencional, sobre a taxa de geração de fumos /36/.

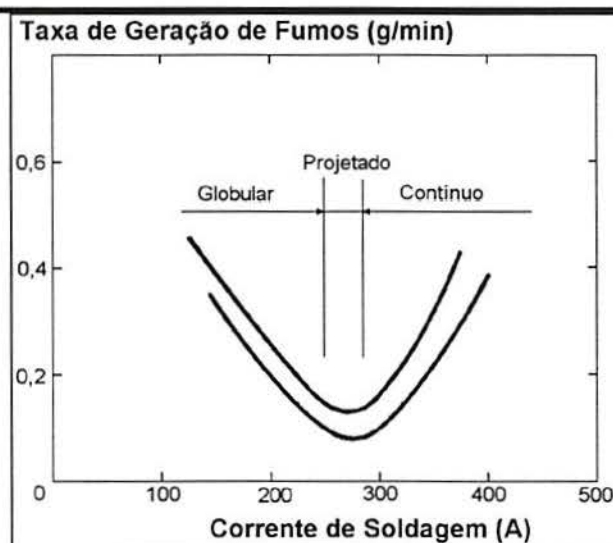


Fig.14: Influência do modo de transferência de massa na taxa de geração de fumos /37/.

4.2.2.- Efeito da Corrente de Soldagem e da Tensão do Arco Sobre a Taxa de Geração de Fumos

Os valores mínimos da taxa de geração de fumos, plotados em função das variações da tensão do arco e da corrente de soldagem, são mostrados na Fig.15, e foram obtidos empregando mistura de gases Ar+5%O₂, arame ER 70 S-2 e diâmetro 1,2 mm /36/. No entanto, com o gás de proteção CO₂, a *TGF* não apresentou valor mínimo, como mostra a Fig.16.

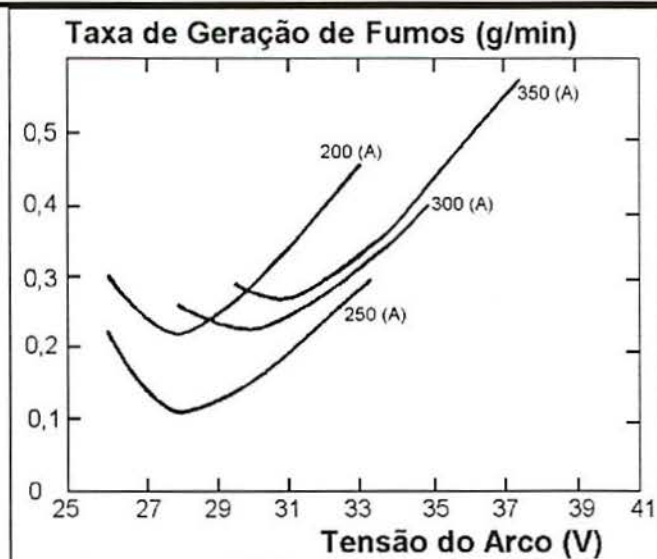


Fig.15: Efeito da tensão e corrente de soldagem, para o processo MIG/MAG convencional e gás de proteção Ar+5%CO₂, sobre a taxa de geração de fumos /36/.

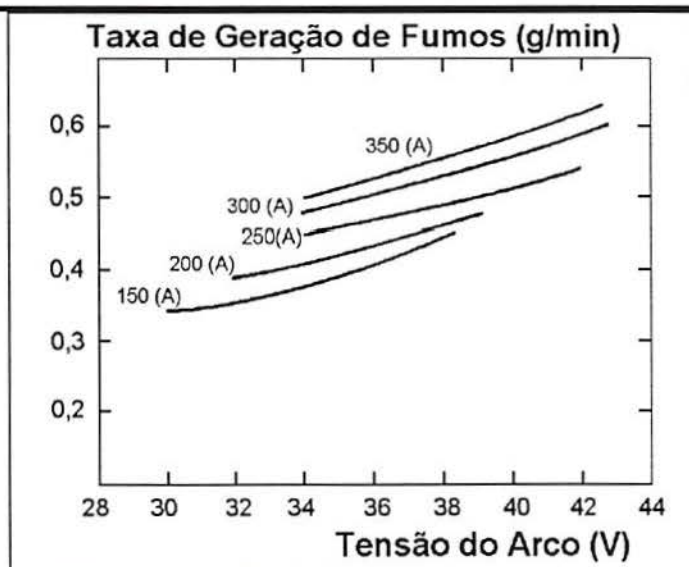


Fig.16: Efeito da tensão do arco e da corrente de soldagem, no processo MIG/MAG convencional e gás de proteção CO₂, sobre a taxa de geração de fumos /36/.

4.3.- Taxa de Fusão do Arame

No modo de transferência projetado, processo MIG/MAG convencional, a taxa de fusão do arame é maior que nos modos de transferência globular e contínuo, Fig.17, /37/, apresentando vantagens em relação às transferências globular e contínuo, por exemplo: livre de salpico; mínima taxa de geração de fumos; alta taxa de deposição; boa aparência do cordão de solda.

Apesar de ser possível obter-se o modo de transferência projetado em uma faixa de corrente de aproximadamente 20 A, é praticamente impossível realizar soldas nesse intervalo tão estreito, no processo MIG/MAG convencional.

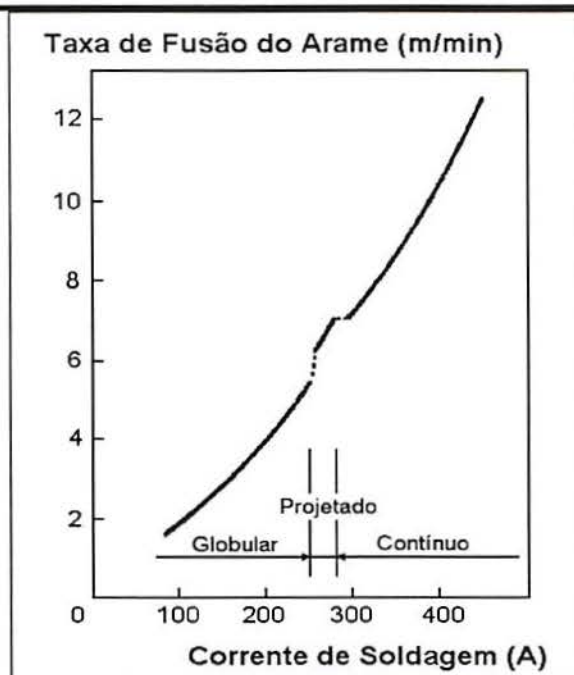


Fig.17: Influência do modo de transferência de massa na taxa de fusão do arame. A.- Globular; B.- Projetado; C.- Contínuo /37/.

4.4.- Modo de Transferência Aerossol Projetado

No processo convencional, se obtém as melhores condições na soldagem com o modo de transferência projetado, para valores de corrente entre 250 e 270 A (C.C.) e empregando arame de aço ao carbono de 1,2 mm de diâmetro. Em trabalhos experimentais, ficou indicado que é possível controlar o modo de transferência aplicando pulsos de corrente, destacando pequenas gotas esféricas.

Usando resultados experimentais determinados pelo processo MIG/MAG convencional, e reproduzindo as condições físicas, para valores de corrente no intervalo de 250 a 270 A, foi possível obter transferência axial-projetado, no processo de soldagem com pulsos de corrente.

4.4.1.- Formação do Pescoço na Ponta do Arame

O modo de transferência projetado começa no instante em que se forma o pescoço, onde a geometria na ponta do arame passa a cônica. A formação do pescoço é a condição necessária para obtenção do modo projetado /37/.

Para valores de corrente inferiores a 250 A, arame de aço ao carbono, diâmetro 1,2 mm, e gás de proteção Ar + 5%CO₂, o mais provável é não obter o modo projetado. Quando a corrente está no intervalo 91 a 147 A, o modo de transferência é globular, e a gota permanece por mais de 20 ms na ponta do arame, antes de ser transferida para a poça de fusão. A resistência do metal

adjacente à linha de fusão é sempre do mesmo valor, porém, a força por efeito “pinch” é proporcional ao quadrado da corrente. O pescoço se formará só quando a força por efeito “pinch” ultrapassa a resistência do metal /37/.

4.4.2.- Temperatura na Ponta do Arame

Para manter a gota fundida e sua forma esférica na ponta do arame, é necessário evitar o modo de transferência contínuo. Para tanto, a temperatura na ponta do arame deve ser controlada. Para reduzir a força devido à tensão superficial, a ponta do arame deve ser aquecida por efeito do arco elétrico, já que a mesma é inversamente proporcional à temperatura.

Com o processo MIG/MAG pulsado, ao aplicar a corrente de base, a temperatura na ponta do arame é relativamente baixa. Portanto, quando aplicado a corrente de pico, a primeira gota é transferida com diâmetro equivalente ao do arame, semelhante ao modo projetado do processo convencional. Depois da primeira gota, a ponta do arame continua se aquecendo e, caso a corrente permaneça no valor de pico, aumentando sua temperatura, e as sucessivas gotas transferidas, serão no modo de transferência contínuo ou rotativo /38/.

No processo MIG/MAG pulsado, para manter o modo de transferência axial-projetado, após a primeira gota, a duração da corrente de pico (T_p) deve ser controlada. O tempo que a gota demora para ser separada (T_s), é dado por:

$$T_s = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3 \quad [4.1]$$

Onde:

T_s = Tempo que a gota demora para ser separada;

Γ_1 = Tempo necessário para o aquecimento e a formação do pescoço;

Γ_2 = Tempo necessário para o crescimento da gota;

Γ_3 = Tempo de separação da gota, no qual, o pescoço é aquecido até o ponto de ebulição; a separação da gota ocorre.

O período de tempo Γ_1 , no qual se produz aquecimento e formação do pescoço, oscila entre 1 e 1,5 ms, dependendo da intensidade da corrente de pico aplicada. Por sua vez, Γ_2 representa o tempo necessário para o crescimento da gota, enquanto o tempo que a mesma demora para ser destacada (Γ_3) - no qual; o pescoço é aquecido até o ponto de ebulição - é menor a 0,2 ms.

O processo de formação do pescoço é unidirecional, ou seja, após iniciado, continua inclusive com redução do valor da corrente de pico /35/.

A variação de T_s é inversamente proporcional ao valor da corrente de pico (I_p), mas independente do tempo de pico T_p .

4.4.3.- Modos de Transferência Projetado e Axial-Projetado

O volume da gota é determinado pela relação entre a força devido à tensão superficial e a força eletromagnética. Utilizando o processo MIG/MAG convencional, arame de aço ao carbono, diâmetro de 1,2 mm, gás de proteção Ar + 5% CO₂, o diâmetro da gota é de 0,7 a 0,9 mm /37/, enquanto que, para o processo MIG/MAG pulsado (pulsos de corrente) e valor de corrente média de soldagem (I_m) 260 A, o diâmetro da gota é de 0,9 a 1,1 mm /38/, sendo este diâmetro maior do que aquele para o processo convencional. No processo MIG/MAG pulsado, o pescoço inicia na ponta obtusa do arame. No processo MIG/MAG convencional, o processo de formação do pescoço começa na ponta cônica do arame /38/.

5.- PROCESSO MIG/MAG PULSADO SINÉRGICO

No processo MIG/MAG pulsado sinérgico, os parâmetros do pulso (corrente de pico, duração da corrente de pico, frequência, etc.) estão relacionados à velocidade de alimentação do arame /39/. Na prática, essa relação é mantida por unidades de controle eletrônico da fonte de soldagem, e os parâmetros do pulso são automaticamente ajustados para qualquer valor de velocidade de alimentação de arame selecionado.

Outras vantagens do processo são: a capacidade de soldar chapas de espessuras inferiores a 6,4 mm; facilidade no controle da poça de fusão em todas as posições de soldagem, e estabilidade na ocorrência de mudanças na velocidade de alimentação de arame.

No processo MIG/MAG convencional, existe equilíbrio médio entre a velocidade de alimentação do arame e a taxa de fusão em um amplo intervalo de corrente de soldagem. Quando a corrente de soldagem é menor do que 50 A, é difícil a realização de cordões de solda de boa qualidade. Por outro lado, quando é necessário o modo de transferência aerossol projetado, a corrente de soldagem deve ser maior do que o valor crítico de corrente da transição globular-aerossol.

No modo de transferência globular, a deposição é irregular e há pouca penetração. Assim, nas aplicações onde são necessários baixa intensidade de corrente de soldagem; posição de soldagem diferente da plana, e materiais sensíveis ao calor de aporte, normalmente, o modo de transferência utilizado é curto-circuito.

As limitações impostas pela transferência globular são superadas, usando-se pulsos de corrente. Essa corrente é modulada periodicamente entre níveis alto e baixo, como é mostrado na Fig.18. Enquanto que o valor da corrente média de soldagem, que tem o mesmo valor daquela que no processo convencional produz transferência globular, a corrente de pico (I_p) excede o valor da corrente de transição do processo convencional, necessário para obter transferência aerossol.

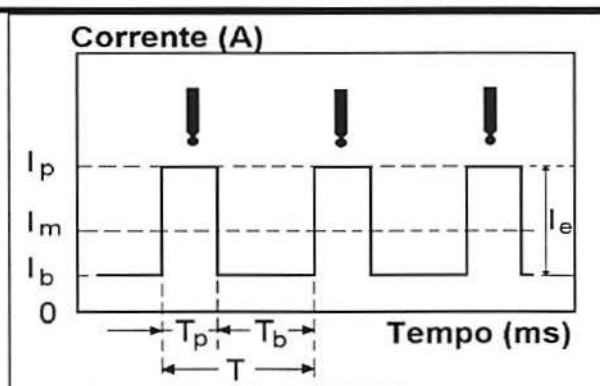


Fig.18: Parâmetros do pulso para a corrente de forma retangular.

No início da década de 80, determinar ótimas condições de soldagem no processo MIG/MAG pulsado era uma tarefa difícil. Cada valor de corrente média ou velocidade de alimentação de arame é determinado pela combinação dos valores de quatro parâmetros de pulso, sendo estabelecido para manter aproximadamente constante o comprimento do arco. Mudanças na velocidade de alimentação do arame ocorriam freqüentemente durante a soldagem com máquinas de soldagem comerciais, causando instabilidade no arco elétrico e no modo de transferência do metal à poça de fusão, e produzindo cordões de solda de dimensões irregulares e defeituosos. Devido a esses motivos no passado, o processo de MIG/MAG pulsado perdeu popularidade na aplicação industrial /39/.

A palavra **SINÉRGICO** provém do grego “synergía” que significa “cooperação ou trabalhar juntos”, que no contexto do processo *MIG/MAG pulsado sinérgico*, significa que, os parâmetros do pulso trabalham em conjunto com a velocidade de alimentação de arame, a qual é igual à taxa de fusão quando existe estabilidade no arco elétrico. Então, a relação entre a velocidade de alimentação de arame e todos os parâmetros relevantes do pulso podem ser combinados.

Aplicando pulsos de corrente, duas condições são essenciais para atingir a estabilidade do arco /39-41/, ou seja:

- ♦ Equilíbrio médio entre a velocidade de alimentação do arame e a taxa de fusão do mesmo, com a condição de manter aproximadamente constante o comprimento do arco;
- ♦ Que em cada pulso seja destacada uma e somente uma gota da ponta do arame. Assim, é possível controlar o modo de transferência de massa, aplicando pulsos periódicos de corrente.

Amin /39/ utilizou três valores de velocidade de alimentação de arame: ($W =$) 2, 2,4 e 4 m/min; dois valores de freqüência de pulso: ($F =$) 25 e 50 Hz; e determinou uma relação linear entre a duração da corrente de pico, ou tempo de pico (T_p), e o volume da gota transferida (v), para os três valores de corrente de pico: $I_p = 200, 250$ e 300 A; (Fig.19). Quando se deseja aumentar o volume da gota destacada, mantendo constante o valor da corrente de pico, é necessário incrementar a duração do pulso (T_p).

Portanto, para aumentar o volume da gota, é necessário um incremento na duração e/ou na amplitude da corrente de pico. Fixando o volume da gota, é possível reduzir a amplitude da corrente de pico e, por sua vez, aumentar o tempo de pico (Fig.20).

A corrente de excesso ($I_e = I_p - I_b$), tem uma ligeira variação quando a velocidade de alimentação de arame é duplicado, enquanto que o tempo de pico e a corrente de base são dobrados. Assim, a corrente de base e o tempo de pico variam proporcionalmente com a velocidade de alimentação de arame. Em geral, a relação sinérgica existe quando há variação na velocidade de

alimentação de arame, e a corrente de base e/ou o tempo de pico ou frequência do pulso variam na mesma proporção, para estabilizar o comprimento do arco /39/.

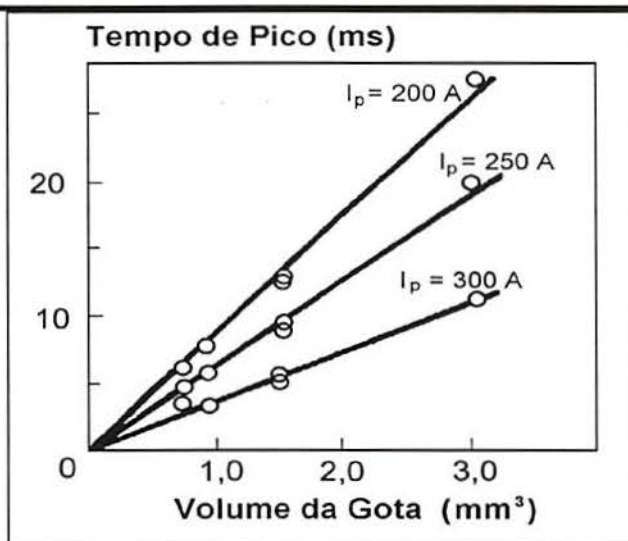


Fig.19: Efeito do tempo e corrente de pico sobre o volume da gota destacada /39/.

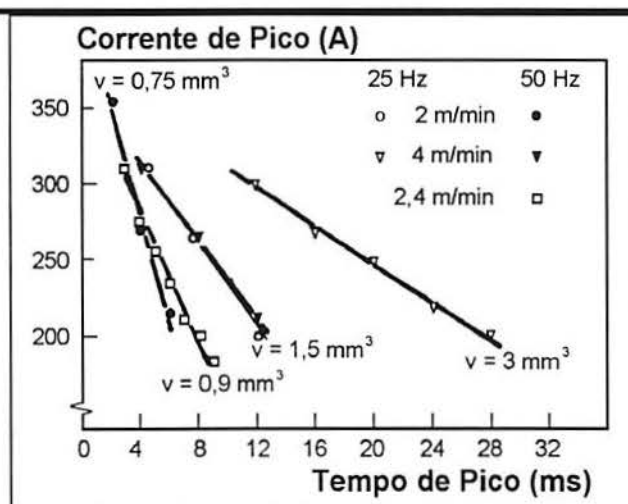


Fig.20: Efeito da corrente e tempo de pico sobre o volume da gota destacada /39/.

5.1.- Taxa de Fusão do Arame

5.1.1.- Processo MIG/MAG Convencional

Smati /42/ utilizou o processo MIG/MAG convencional, para facilitar a interpretação, análise, e aplicação das equações da taxa de fusão, em função das propriedades físicas e dos parâmetros de soldagem. Definindo que a aproximação da ótima transferência do metal da ponta do arame à poça de fusão, requer duas condições essenciais /42/:

a.- A estabilidade na transferência de massa do arame à poça de fusão;

b.- A velocidade de alimentação do arame deve ser equilibrada com a taxa de fusão do mesmo, para manter aproximadamente constante o comprimento do arco.

A taxa de fusão do arame está determinada pela quantidade de calor (J/s), sendo transferida ao arame e dividida pela energia necessária (J/m), para fundi-lo. A energia fornecida ao sistema (aramé - metal base) está composta pelos seguintes fatores:

♦ Calor gerado pela extensão do arame (s), devido ao efeito Joule, $\frac{s \cdot \bar{\rho} I^2}{A}$;

♦ A queda de tensão do ânodo (U_a), a qual deve-se ao impacto dos elétrons (energia cinética), $U_a I$;

♦ A temperatura dos elétrons que chegam ao ânodo, a qual é proporcional à corrente do arco, e pode ser representada como uma queda de tensão $(2/3) \cdot k \cdot T_e / e = U_r$;

♦ A função trabalho (ϕ) da superfície do ânodo, a qual é igual à energia potencial convertida pelos elétrons, quando os mesmos atingem o ânodo ϕI ;

A energia total necessária para fundir e destacar uma unidade de volume de arame ($H_0 = 1,75 \times 10^{10} \text{ J/m}^3$ para o aço /43/) pode ser assim expressa:

a.- Como a energia requerida para elevar sua temperatura, desde a temperatura ambiente até o ponto de fusão;

b.- Elevando parte até seu ponto de ebulição, e vaporizando uma pequena quantidade.

Equilibrando a energia necessária para fundir o volume de arame e o calor fornecido pela fonte de soldagem, têm-se:

$$A \cdot W \cdot H_0 = (\phi + U_a + U_r) \cdot I + \frac{s \cdot \bar{\rho} I^2}{A} \quad [5.1]$$

$$W = \frac{(\phi + U_a + U_r) \cdot I}{A \cdot H_0} + \frac{s \cdot \bar{\rho} I^2}{A^2 \cdot H_0} \quad [5.2]$$

Onde:

$\bar{\rho}$ = Resistividade elétrica média da extensão do arame;

A = Seção transversal do arame;

I = Corrente de soldagem;

W = Velocidade de alimentação do arame.

A resistividade elétrica média ($\bar{\rho}$) não é muito sensível às variações de corrente /44/, portanto a equação [5.2] pode ser escrita como:

$$W = K_1 \cdot I + K_2 \cdot s \cdot I^2 \quad [5.3]$$

Onde $K_1 = \frac{\phi + U_a + U_T}{A.H_0}$ e $K_2 = \frac{\bar{\rho}}{A.H_0}$ são constantes. Sendo a equação [5.3] verificada

por Amson /18/ e Halmφy /45/.

A tensão do arco é afetada pelo modo de transferência do metal, o qual está relacionado com a corrente de soldagem. A representação esquemática das quedas de tensão do ânodo ao cátodo é mostrado na Fig.21. Estas quedas de tensão estão dadas pelas seguintes equações:

$$U_o = R_o . I + U_p \quad [5.4]$$

$$U_p = U_s + U_L \quad [5.5]$$

$$U_L = U_c + U_a + E . L \quad [5.6]$$

$$U_s = \frac{s . \bar{\rho} . I}{A} \quad [5.7]$$

Onde:

E = Campo elétrico no arco;

L = Comprimento do arco;

R_o = Resistência elétrica interna da fonte de energia;

U_a = Queda de tensão do ânodo;

$U_a . I$ = Energia cinética dos elétrons que atingem a ânodo;

U_c = Queda de potencial catódica;

U_g = Queda de potencial do plasma;

U_L = Queda de potencial do arco;

U_o = Tensão de circuito aberto;

U_p = Tensão do bico de contato até o metal base;

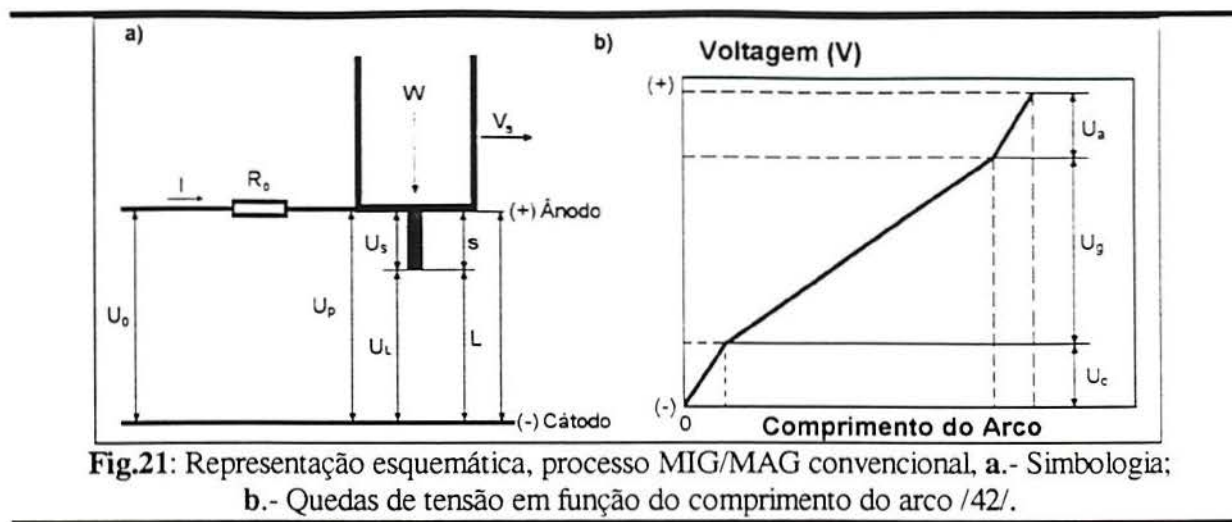
U_s = Tensão devido à extensão do arame;

U_T = Tensão devido à temperatura dos elétrons do ânodo.

Combinando as equações [5.5], [5.6] e [5.7], e substituindo na [5.4], se tem a equação para circuito aberto:

$$U_o = (U_c + U_a) + \left(\frac{s . \bar{\rho}}{A} + R_o \right) . I + E . L \quad [5.8]$$

Portanto, a equação [5.8] mostra que o comprimento do arco pode ser mantido constante, utilizando uma fonte de potência com curva característica corrente constante e tensão de circuito aberto invariável.



5.1.2.- Processo MIG/MAG Pulsado

Vários autores /42, 46, 47/, utilizaram o processo MIG/MAG pulsado, na discussão do aspecto matemático da taxa de fusão do arame, para condições estáveis, e assumiram que os pulsos periódicos de corrente de soldagem era de forma retangular, determinando a seguinte relação:

$$W = K_1 \cdot I_m + s \cdot K_2 \cdot \frac{(I_p^2 T_p + I_b^2 T_b)}{T} \quad [5.9]$$

Onde:

I_b = Corrente de base;

I_m = Corrente média;

I_p = Amplitude do pulso ou corrente de pico;

m_{fa} = Fator de fusão do arame;

T = Período do pulso ($T_p + T_b$) = $1/F$;

T_b = Tempo de base ou duração da corrente de base;

T_p = Tempo de pico ou duração da corrente de pico;

v = Volume da gota destacada;

W = Velocidade de alimentação do arame.

O termo relativo ao efeito Joule na equação [5.9] deve ser utilizado para se trabalhar com a corrente em um amplo intervalo, pois o mesmo é importante quando se tem altos valores de corrente e arames com elevada resistividade. Entretanto, a equação pode ser linearizada se o termo em questão for feito proporcional à corrente média. Para tanto, pode-se empregar a relação entre a velocidade de alimentação do arame e o volume do mesmo fundido por unidade de tempo, a qual é dada por:

$$\frac{v}{T} = W \cdot A \quad [5.10]$$

portanto:

$$T = \frac{v}{W \cdot A} \quad [5.11]$$

Dessa forma, considerando a equação [5.9], se tem:

$$W = K_1 \cdot I_m + s \cdot K_2 \cdot (I_p^2 T_p + I_b^2 T_b) \cdot \frac{W \cdot A}{v} \quad [5.12]$$

onde:

$$W = \frac{K_1}{1 - \frac{s \cdot K_2 \cdot A (I_p^2 T_p + I_b^2 T_b)}{v}} \cdot I_m \quad [5.13]$$

Na prática o produto $[(I_p)^2 \cdot T_p]$ é muito maior do que $[(I_b)^2 \cdot T_b]$. Simplificando, resulta:

$$W = \frac{K_1}{1 - \frac{s \cdot K_2 \cdot A \cdot I_p^2 T_p}{v}} \cdot I_m \quad [5.14]$$

Se os seguintes fatores são mantidos constante v , s , $(I_p)^2$ e T_p , se obtém:

$$W = m_{fa} \cdot I_m \quad [5.15]$$

onde:

$$m_{fa} = \frac{K_1}{1 - \frac{s \cdot K_2 \cdot A \cdot I_p^2 T_p}{v}} \quad [5.16]$$

Empregando-se a equação [5.8] da tensão de circuito aberto do processo convencional, no processo pulsado, pode ser expressa em função de I_m :

$$U_o = (U_c + U_a) + E \cdot L + \left(R_o + \frac{\bar{\rho} \cdot s}{A} \right) \cdot I_m \quad [5.17]$$

Da equação [5.17] pode ser deduzida o comprimento do arco, dado por:

$$L = \frac{U_o - \left\{ (U_c + U_a) + \left(R_o + \frac{\bar{\rho} \cdot s}{A} \right) \cdot I_m \right\}}{E} \quad [5.18]$$

Portanto, a equação [5.18] mostra que o comprimento do arco pode ser mantido aproximadamente constante, utilizando uma fonte de potência com curva característica corrente constante e tensão de circuito aberto invariável /42/.

As equações [5.13] e [5.17] são muito importantes, pois com elas é possível determinar as diversas combinações de parâmetros de soldagem, para produzir cordões de solda com as características desejadas.

5.1.3.- Taxa de Fusão e Velocidade de Alimentação do Arame

Lesnewich /15/, no seu trabalho experimental, estabeleceu a relação entre a densidade de corrente de soldagem, a extensão do arame, e a velocidade de alimentação do arame, para o processo MIG/MAG convencional, mediante a seguinte expressão:

$$W = K_{01} \cdot j + K_{02} \cdot s \cdot j^2 \quad [5.19]$$

Onde:

j = Densidade de corrente de soldagem;

s = Extensão do arame;

K_{01} e K_{02} = Constantes de proporcionalidade.

No estado estacionário, a velocidade de alimentação do arame é igual à sua taxa de fusão. Sendo a quantidade de calor por unidade de volume da gota, no instante em que é destacada, igual a H_0 . O calor recebido na ponta do eletrodo (ânodo) é $H_a = \phi \cdot j / W$. Onde $H_L = a \cdot s \cdot j^2 / W - b$, e considera o efeito do aquecimento devido à extensão do arame. O valor de “ b ” depende do material do arame, e está relacionado à resistividade /45/. Quando a temperatura da gota está acima do ponto de fusão, obtém-se a seguinte expressão:

$$H_0 = H_a + H_L \quad [5.20]$$

$$W = \frac{I}{H_0 + b} \cdot (\phi \cdot j + a \cdot s \cdot j^2) = \left(\frac{\phi}{H_0 + b} \right) \cdot j + \left(\frac{a}{H_0 + b} \right) \cdot s \cdot j^2 \quad [5.21]$$

Onde:

H_0 = Quantidade de calor necessária para fundir uma unidade de volume de arame (formar e destacar a gota);

H_a = Quantidade de calor do ânodo;

H_L = Considera o efeito do aquecimento devido à extensão do eletrodo.

Comparando a equação [5.21] com a [5.19], se tem as seguintes igualdades:

$$K_{01} = \left(\frac{\phi}{H_0 + b} \right) \quad [5.21a]$$

$$K_{02} = \left(\frac{a}{H_0 + b} \right) \quad [5.21b]$$

Halmøy /45/, concluiu que, o valor da função trabalho (ϕ) não é muito afetado pelos elementos de liga, sendo praticamente constante para a maioria dos metais. A queda de potencial não contribui para a fusão no ânodo. Para tal situação, o potencial anódico não é afetado pelas mudanças ocorridas na composição do gás de proteção. Portanto, não há variações substanciais na

taxa de fusão do arame e a tensão da coluna do arco não contribui para a variação da taxa de fusão, o que é claramente demonstrado quando é realizada a soldagem com corrente e velocidade de alimentação do arame constantes.

Substituindo-se os valores das constantes determinadas por Matsuda *et al.* /46/ na relação [5.21] e a densidade é substituída pela intensidade da corrente, para as condições dadas na Tabela 2 abaixo, fica:

$$W = 0,264 \cdot I + 5,86 \cdot 10^{-5} \cdot s \cdot I^2 \quad [5.22]$$

Na equação [5.22], o primeiro termo representa o aquecimento devido ao arco elétrico, e o segundo termo é devido ao efeito Joule.

Quando a equação [5.21] é aplicada ao processo de soldagem MIG/MAG pulsado, com a forma da onda retangular e a densidade é substituída pela intensidade da corrente, para as condições dadas na Tabela 2 abaixo, a mesma se transforma em:

$$W = 0,264 \cdot I_m + 5,86 \cdot 10^{-5} \cdot s \cdot I_{ef}^2 \quad [5.23]$$

ou

$$W = 0,264 \cdot \frac{I_p T_p + I_b T_b}{T_p + T_b} + 5,86 \cdot 10^{-5} \cdot s \cdot \frac{I_p^2 T_p + I_b^2 T_b}{T_p + T_b} \quad [5.24]$$

Utilizando as equações [5.22] e [5.24] pode-se comparar o valor da corrente média do processo pulsado à corrente contínua do convencional, quando a extensão do arame é igual e o termo devido ao efeito Joule (I^2) no processo convencional à corrente eficaz (I_{ef})² do pulsado.

Outra comparação muito importante a se realizar, é a relação entre o calor gerado pelo arco e aquele devido ao efeito Joule. Empregando-se as correntes média (I_m)² e eficaz (I_{ef})², têm-se a seguinte relação:

$$\frac{I_m^2}{I_{ef}^2} = \left(\frac{I_p T_p + I_b T_b}{T_p + T_b} \right)^2 \cdot \left(\frac{I_p^2 T_p + I_b^2 T_b}{T_p + T_b} \right)^{-1} \quad [5.25]$$

ou

$$\frac{I_m^2}{I_{ef}^2} = \frac{(I_p T_p + I_b T_b)^2}{(I_p T_p + I_b T_b)^2 + (I_p - I_b)^2 T_p T_b} \quad [5.26]$$

A equação [5.26] mostra que a geração de calor devido ao efeito Joule, empregando pulsos de corrente, é maior do que a corrente média, a qual é equivalente à corrente contínua. Portanto, o aquecimento devido ao efeito Joule no processo pulsado pode ser utilizado para aumentar a taxa de fusão do arame, ou seja, no aumento da velocidade de alimentação de arame.

5.1.4.- Efeitos da Forma de Onda Trapezoidal Sobre a Taxa de Fusão

Estudos realizados empregando o processo MIG/MAG convencional, demonstraram /48, 49/ a importância do comportamento dinâmico da fonte, em função do tempo, para o modo de transferência curto-circuito.

A relação determinada por Lesnewich /15/, pode ser aplicada para pulsos de corrente de qualquer forma (retangular, trapezoidal, triangular, etc.) /48, 49/, onde K_1 é a constante associada ao calor do arco elétrico, e K_2 é a constante devido ao efeito Joule, a qual depende somente da composição e diâmetro do arame.

A extensão do arame, que conduz a corrente de soldagem, depende do ponto de contato elétrico no interior do bico ao arame, o qual pode-se alterar quando o bico está gasto, ou por variações na condição superficial do arame. A mesma depende, também, da localização relativa do arco em relação à ponta do arame, que, por sua vez, é função da composição do gás e do arame.

Utilizando a expressão da corrente eficaz em função dos parâmetros do pulso:

$$I_{ef}^2 = \frac{I}{T} \cdot \int_0^T i_{(t)}^2 \cdot dt = \frac{I_p^2 \cdot T_p + I_b^2 \cdot T_b}{T_p + T_b} \quad [5.27]$$

$$I_{ef}^2 = I_m^2 + (I_p - I_b)^2 \cdot \frac{T_p}{T_p + T_b} \cdot \left(1 - \frac{T_p}{T_p + T_b} \right) \quad [5.28]$$

Substituindo na expressão geral $W = K_1 \cdot I_m + K_2 \cdot s \cdot I_{ef}^2$, se tem:

$$W = K_1 \cdot I_m + K_2 \cdot s \cdot \left\{ I_m^2 + (I_p - I_b)^2 \cdot \frac{T_p}{T_p + T_b} \cdot \left(1 - \frac{T_p}{T_p + T_b} \right) \right\} \quad [5.29]$$

Quando a corrente I_m é de valor relativamente baixo, a taxa de fusão pode ser incrementada em até 50%, como resultado do termo da corrente de excesso ($I_p - I_b$).

Outro fator muito importante na taxa de fusão do arame, é a taxa de crescimento e a de decréscimo da corrente de soldagem, isto é, quando passa da corrente de base à de pico, e vice-versa. Na prática, a transição não se realiza de forma instantânea, como no caso idealizado de pulso de forma retangular. No entanto, a resposta da taxa ($\Delta I / \Delta T$) é finita, e influi na taxa de fusão do arame /50/.

Considerando a forma da onda trapezoidal idealizada, como mostra a Fig.22, com seus respectivos parâmetros, a taxa de crescimento da corrente do valor de base ao valor de pico, é definida como:

$$\left(\frac{\Delta I}{\Delta T} \right) = \left(\frac{I_p - I_b}{T_i} \right) \quad [5.30]$$

Com alteração da corrente de pico à de base, a definição é a seguinte:

$$\left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right) = -\left(\frac{I_p - I_b}{T_3}\right) \quad [5.31]$$

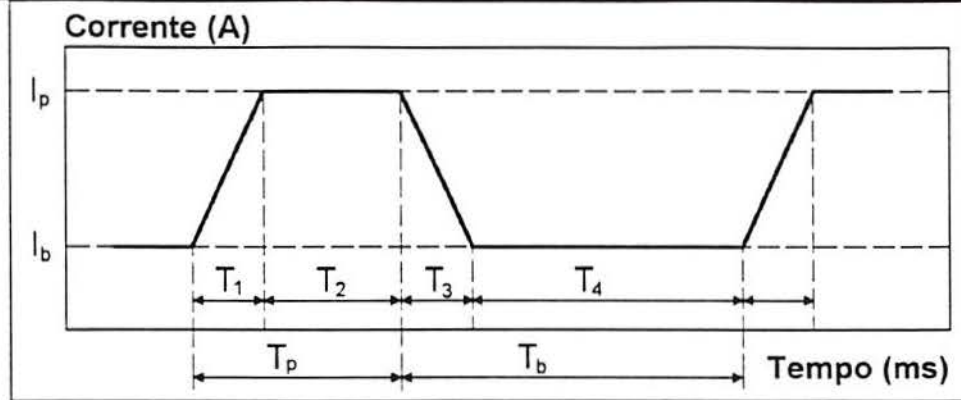


Fig.22: Parâmetros da forma de onda de corrente trapezoidal /50/.

Richardson *et al.* /50/, para o propósito da discussão, consideraram $T_1 = T_3$, chegando à seguinte expressão final:

$$W = K_1 \cdot I_m + K_2 \cdot s \cdot \left\{ I_m^2 + \frac{(I_p - I_b)^2 \cdot T_p \cdot T_b}{T_p + T_b} - \frac{(I_p - I_b)^3}{3 \cdot (T_p + T_b) \cdot (\Delta I / \Delta T)} \right\} \quad [5.32]$$

A equação [5.32] indica que, quando a diferença entre as correntes de pico e a de base é grande, com resposta lenta, e valor de $(\Delta I / \Delta T)$ baixo, a taxa de fusão é reduzida.

Concluindo, a taxa de fusão depende dos valores dos parâmetros de pulso e da dinâmica da fonte e, também, de outro fator muito importante, o qual é o modo de transferência de massa.

Em determinadas condições, com altos valores de $(\Delta I / \Delta T)$, o tamanho do diâmetro da gota destacada é de valor aproximado ao do arame, e quando os valores dos parâmetros são otimizados, o diâmetro da gota é ainda menor. Para uma redução do valor da taxa $(\Delta I / \Delta T)$, o tamanho da gota aumenta, mudando o modo de transferência de axial-projetado para globular, dependendo do diâmetro do arame e dos valores dos parâmetros do pulso /50/.

Nas condições de soldagem onde a resposta da fonte é elevada ($\Delta I / \Delta T \approx 3000$ A/ms), o diâmetro da gota é da ordem de 0,1 a 0,3 mm. Esse comportamento sugere que pode ser associado ao impacto físico do metal fundido na ponta do arame, talvez pela rápida expansão-contracção do plasma da coluna do arco /50/.

5.1.5.- Valores das Constantes Devido ao Arco Elétrico e ao Efeito Joule

Da equação [5.22] verifica-se que o arame funde devido ao calor obtido por efeito Joule; da resistência elétrica da extensão do arame, e ao calor do arco propriamente dito, sendo aproximadamente proporcional à corrente de soldagem, apesar do efeito Joule ser dependente da corrente de soldagem e da extensão do arame. Existe uma relação entre os três parâmetros: taxa de fusão do arame, corrente de soldagem, e extensão do arame.

O comprimento do arco, desde a ponta do arame até o metal base, pode ser determinado conhecendo-se a corrente de soldagem, a tensão do arco, e a composição do gás de proteção. A tensão do arco é impossível de ser medida diretamente.

Na Tabela 2 são mostrados os valores das constantes K_1 e K_2 , determinados por vários pesquisadores /46, 47, 51/.

Tab.2: Comparação de alguns valores das constantes devido ao arco (K_1) e ao efeito Joule (K_2).

Autor	Processo MIG/MAG	Arame		Gás de Proteção	K_1 $\text{mm.A}^{-1}.\text{s}^{-1}$	K_2 $\text{A}^{-2}.\text{s}^{-1}$
Matsuda <i>et al.</i> /46/	Pulsado	Aço ao carbono	d = 1,2 mm	Ar+20%CO ₂	0,264	$5,86.10^{-5}$
Allum <i>et al.</i> /47/	Convencional	Aço ao carbono	d = 1,2 mm	Ar+5%CO ₂	$\approx 0,3$	5.10^{-5}
Mauro <i>et al.</i> /51/	Convencional	Aço ao carbono	d = 1,2 mm	Ar	0,311	$4,63.10^{-5}$

5.2- Critérios para a Determinação dos Parâmetros de Pulso

No processo MIG/MAG pulsado, praticamente, é difícil estabelecer as ótimas condições do pulso por tentativa e erro, já que os parâmetros do pulso devem ser ajustados, para cada valor de velocidade de alimentação do arame.

Amin /40/, estabeleceu três critérios essenciais para selecionar os parâmetros de pulso no processo MIG/MAG pulsado, os quais são:

5.2.1.- Taxa de Fusão do Arame: Equilíbrio médio entre a velocidade de alimentação do arame e a taxa de fusão do mesmo, necessário para manter o comprimento do arco aproximadamente constante.

5.2.2.- Modo de Transferência de Massa: O modo de transferência axial-projetado deve ser obtido ainda com baixa velocidade de alimentação do arame, a qual causaria transferência globular no processo convencional.

5.2.3.- Estabilidade do Arco: A corrente de base deve exceder o limite inferior, para manter estável o arco, pois para menores valores o arco se extinguiria.

5.2.1.- Taxa de Fusão do Arame

As combinações das características do pulso podem ser expressas por meio de funções, qualquer que seja o valor de corrente média.

Amin /40/, representou a corrente em função da velocidade de alimentação do arame, usando distância normal do bico de contato-metal base, comprimento médio do arco, para várias combinações de *material-diâmetro do arame-gás de proteção*, mostradas na Fig.23. A característica de fusão tem relação linear, com a seguinte equação:

$$I_m = m_{fa} \cdot W + k_0 \quad [5.33]$$

Onde:

m_{fa} = Fator de fusão do arame

k_0 = Interseção na ordenada;

I_m = Corrente média.

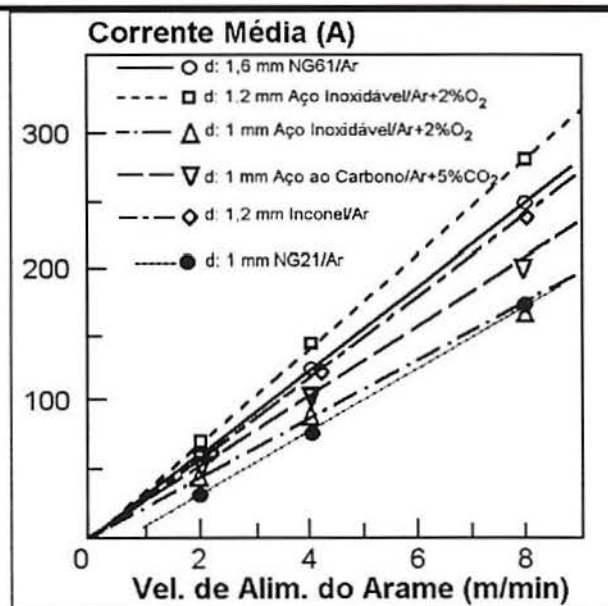


Fig.23: Característica de fusão para varias combinações de *material-diâmetro do arame-gás de proteção*, processo MIG/MAG pulsado /40/.

Os valores de parâmetros do pulso, necessários para manter o comprimento do arco constante, podem ser calculados com as seguintes equações:

♦ Corrente média:

$$I_m = \left(I_p \cdot T_p + I_b \cdot T_b \right) \cdot F \quad [5.34]$$

♦ Amplitude do pulso

$$I_p = \left(\frac{T}{T_p} \right) \cdot I_m - \left(\frac{T}{T_p} - 1 \right) \cdot I_b \quad [5.35]$$

A equação [5.35], define a corrente de pico (I_p) em função da corrente de base (I_b), corrente média (ou velocidade de alimentação do arame); tempo de pico, e período do pulso. Na Fig.24, vê-se que, para um valor de tempo de pico e período do pulso (T_p/T), existe uma relação linear entre a corrente de pico e a corrente de base; o excesso do pulso (I_e) decresce com o aumento da corrente de base. O valor máximo da corrente de pico está limitado pela intercepção $[(T/T_p) \cdot I_m]$, pois o valor da corrente de base é desprezível no contexto. O valor mínimo possível está determinado pela igualdade $I_p = I_b = I_m$. Modificando o tempo de pico e mantendo constante o período do pulso, os valores da corrente de pico e da corrente de base são afetados.

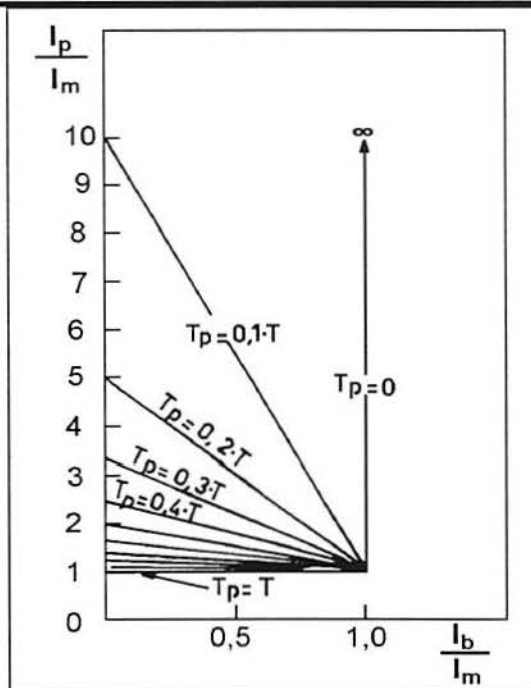


Fig.24: Efeito das correntes de pico e base normalizadas em relação à corrente média (I_p/I_m , I_b/I_m e T_p/T), no processo MIG/MAG pulsado /40/.

O período do pulso é determinado pela quantidade de material que se deseja destacar, ou seja, pelo volume da gota por ciclo, sendo dado pela seguinte expressão:

$$T = \frac{240 \cdot v}{\pi \cdot d^2 \cdot W} \quad (\text{ms}) \quad [5.36]$$

Onde:

d = Diâmetro do arame (eletrodo);

v = Volume da gota destacada;

W = Velocidade de alimentação do arame;

T = Período do pulso ($T_p + T_b$) = $1/F$.

5.2.2.- Modo de Transferência de Massa

Algumas combinações do critério “taxa de fusão do arame” não produzem o modo de transferência axial-projetado, isto é, quando a amplitude e/ou a duração do pulso forem insuficiente para destacar o volume da gota desejado.

Os valores da corrente e tempo de pico estão limitados pela necessidade de destacar uma gota por período. Para tanto é definido o seguinte “limite de amplitude e duração do pulso” /40/:

♦ - Limite da amplitude e duração do pulso

Em geral, a amplitude é inversamente proporcional à duração da corrente de pico ($T_p \propto I_p^{-2,3}$). Essa relação foi estabelecida com os dados /39, 41, 51/ de corrente e duração necessária para destacar um volume de gota da ponta do arame, por período de pulso (Fig.25). Assim, a relação entre I_p e T_p , para volume constante da gota, é a seguinte:

$$K_v = T_p \cdot I_p^{2,3} \quad [5.37]$$

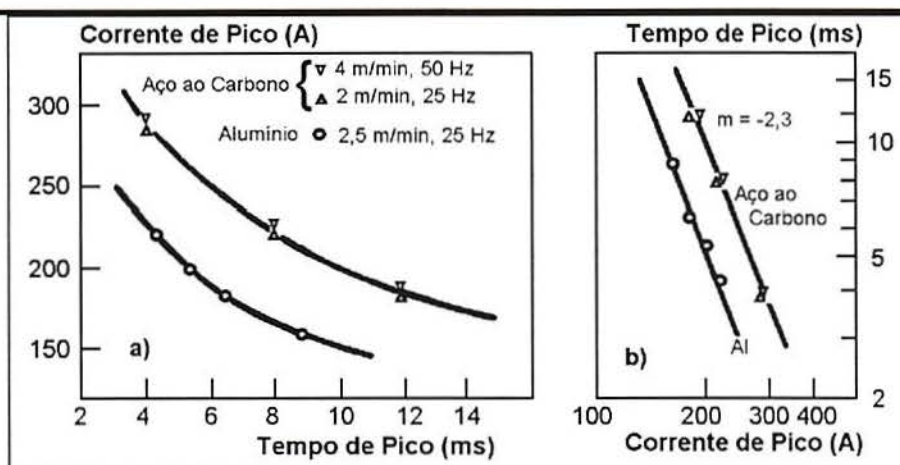


Fig.25: Relação entre a corrente e tempo de pico para um volume de gota de $1,5 \text{ mm}^3$,
a.- Escala linear b.- Escala logarítmica /40/.

Para cada combinação de *material-diâmetro do arame-gás de proteção*, K_v é constante em um determinado volume de gota transferido por período de pulso. A mesma pode ser usada para analisar o valor limite da corrente de pico para quaisquer tempos de pico.

5.2.3.- Estabilidade do Arco

As combinações dos parâmetros de pulso são limitadas pela necessidade da corrente de base, e esta deve exceder o valor mínimo, pois o arco pode ser instável para baixos valores de corrente de base (I_b). O limite é expresso pela seguinte equação:

$$I_b \propto C \quad [5.38]$$

Onde:

I_b = Corrente de base;

C = Limite de corrente base para a estabilidade do arco.

A corrente de base deve satisfazer os critérios Taxa de Fusão do Arame, Modo de Transferência de Massa, e também o de Estabilidade do Arco.

5.3.- Efeito das Correntes Média e Contínua na Estabilidade do Arco

Empregando-se baixos valores de corrente de soldagem no processo MIG/MAG convencional, o movimento do arco é irregular, o que torna difícil a separação da gota, ocasionando instabilidade no arco. A comparação da zona de estabilidade do arco elétrico nos processos MIG/MAG convencional e pulsado é mostrada na Fig.26. Porém, no processo MIG/MAG pulsado a zona estável é maior, apresentando estabilidade ainda com baixos valores de corrente média.

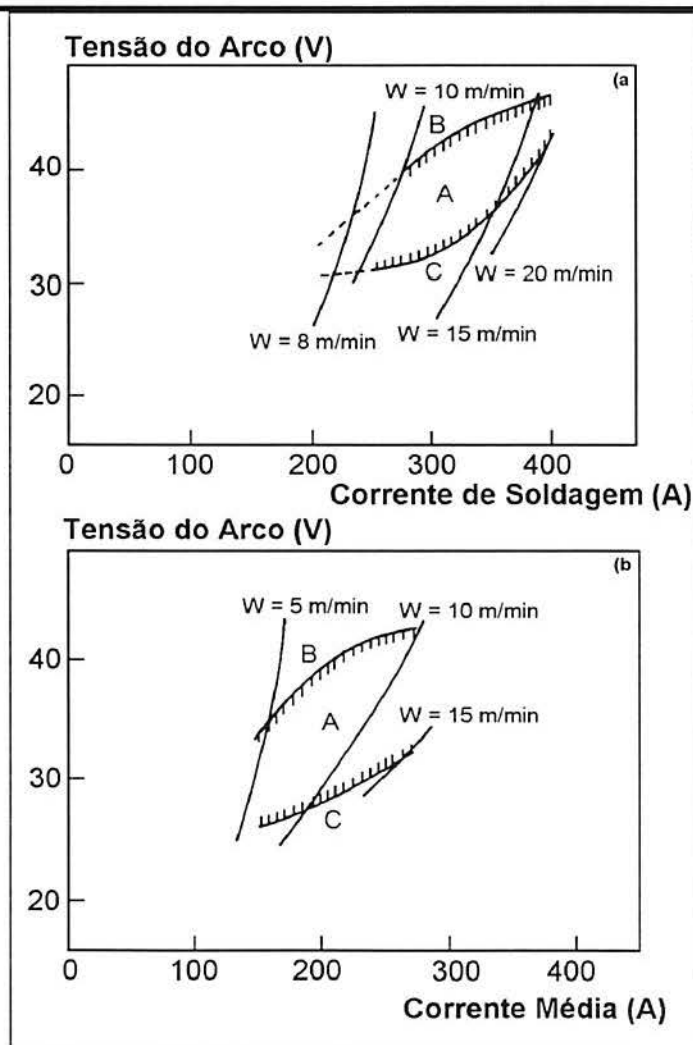


Fig.26: Diferentes zonas para vários valores de tensão do arco, corrente média e velocidade de alimentação do arame. **a.-** MIG/MAG convencional e **b.-** MIG/MAG pulsado. **A** - Zona Estável; **B** - Zona Instável; **C** - Zona com Muito Salpico /46/.

5.3.1.- Efeito das Condições do Pulso na Característica de Transferência de Massa

Os critérios básicos a serem considerados no estudo e análise dos parâmetros no processo MIG/MAG pulsado, são:

- a.- Equilíbrio médio entre a velocidade de alimentação do arame e a taxa de fusão, o que é necessário para manter o comprimento do arco elétrico aproximadamente constante;
- b.- Que em cada pulso seja destacada uma e somente uma gota da ponta do arame à peça.

Matsuda *et al.* /46/, estudaram a característica de transferência de massa, no processo MIG/MAG pulsado; arame de aço ao carbono com diâmetro de 1,2 mm; misturas de gases Ar+20%CO₂ e 100%Ar e vazão do gás de proteção de 25 l/min.

Os autores ajustaram a duração da corrente de pico, até destacar uma gota por período de pulso, para assim satisfazer as condições “a” e “b” descritas acima. Na Fig.27 (a-d), a seta indica o instante em que a gota é separada do arame, quando é variado o valor do tempo de pico, mantendo constante a corrente de pico e a velocidade de alimentação do arame. Quando o tempo de pico diminui, o tempo necessário para destacar uma gota do arame aumenta, até que a condição (“b”) de uma gota por período de pulso não seja satisfeita ($T_p < 2,2$ ms), isto é para um mesmo valor de corrente de pico. A Fig.27 (e-g) mostra que, se a corrente e tempo de pico são mantidos constantes, modificando a duração da corrente de base (T_b) ou frequência do pulso, a condição “b” é satisfeita, e todos os tempos de separação da gota são coincidentes. Concluindo, para manter o comprimento do arco aproximadamente constante, é necessário que exista equilíbrio entre a taxa de fusão e a velocidade de alimentação do arame, o que pode ser obtido controlando-se os valores da corrente (I_p) e tempo de pico (T_p).

A situação mostrada na Fig.27 (e-f), em que a gota é separada em fase com a corrente de base, apresenta as seguintes vantagens: evita a explosão da gota reduzindo assim o nível de salpico, estabiliza o movimento do metal líquido na poça de fusão, e o aporte de energia é menor.

A zona estável de uma gota por período de pulso, e a relação entre a velocidade de alimentação do arame e o tempo de pico (T_p , ms) são mostradas na Fig.28. No ponto médio “A”, a gota é destacada no tempo ($T_b/2$). Aumentando o tempo de pico, ou diminuindo a velocidade de alimentação do arame desde o ponto “A”, o tempo de separação da gota diminui, e vice-versa. É ampla a zona de estabilidade, para destacar uma gota por período de pulso de corrente.

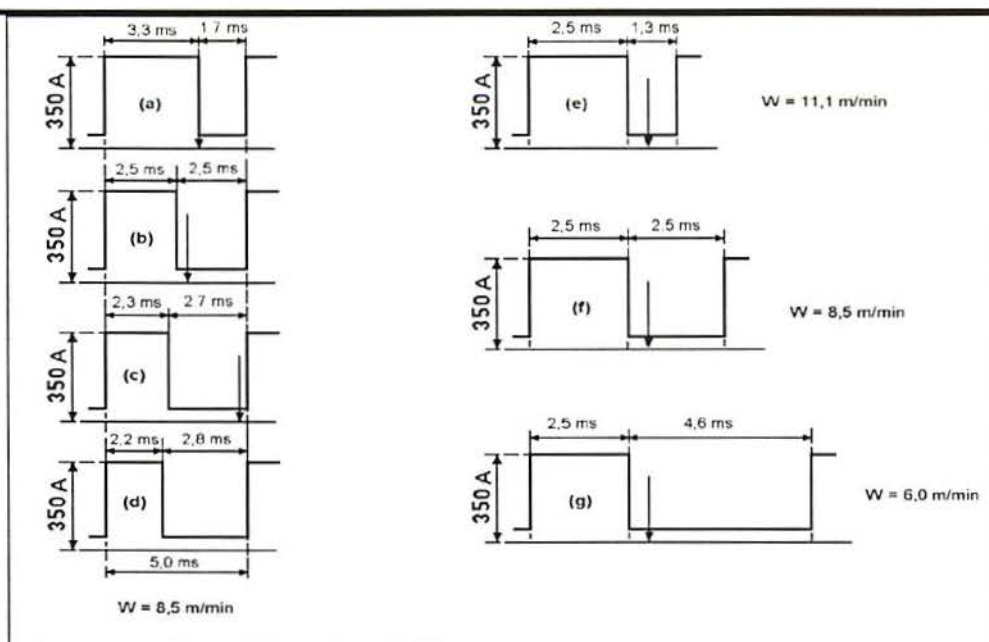


Fig.27: Variação dos parâmetros do pulso, para a obtenção de uma gota por período de pulso. A seta indica o instante em que ocorre a separação da gota /46/.

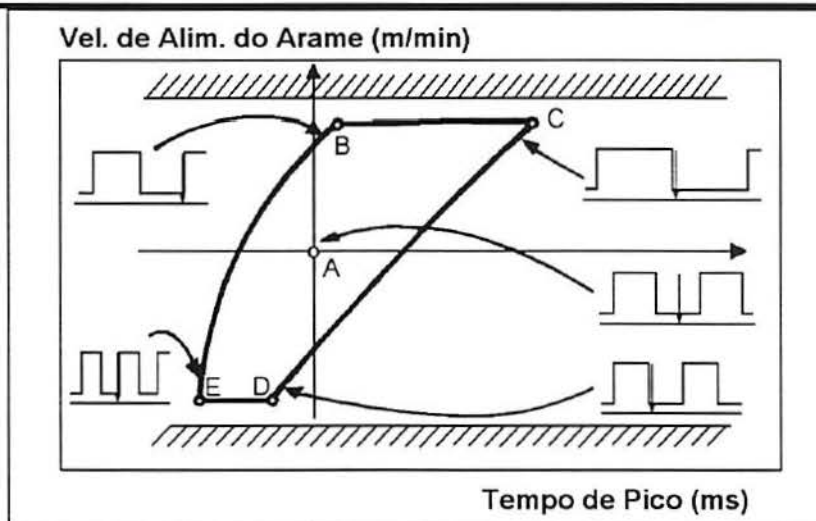


Fig.28: Zona estável de uma gota por período de pulso, em função da velocidade de alimentação do arame e tempo de pico /46/.

5.3.2.- Efeito da Corrente de Pico na Condição de uma Gota por Período de Pulso

A velocidade de alimentação do arame em função do tempo de pico é mostrada na Fig.29, sendo que quando aumenta a corrente de pico (I_p), a duração do mesmo diminui /46/.

O incremento no valor da corrente de pico faz que o tempo necessário para a formação da gota seja menor, reduzindo o tempo de pico. Analisando-se a Fig.30, esse efeito pode ser interpretado com maior facilidade.

Alguns autores /39, 40, 46/ concluíram, que a separação da gota deve ocorrer após a corrente de pico, beneficiando a soldagem do alumínio e suas ligas. Entretanto, para outras ligas, é necessário que a gota seja expelida durante a aplicação da corrente de pico.

No entanto, a base essencial para determinar os parâmetros de pulso é destacar uma gota por período (T), ainda com a corrente de pico atuando, com diâmetro da gota esférica equivalente ao do arame. Com isso, se minimiza a energia do pulso, e maximiza a energia devido à corrente de base, para valores baixos de corrente média (I_m). Isso não é muito importante quando o valor da corrente média é alto, sendo a energia alta, e pode se dissipar durante a aplicação da corrente de base, garantindo a estabilidade do arco. Porém, para baixos valores de corrente média ($I_m < 100$ A, dependendo do diâmetro do arame), a energia de base tem efeito significativo na estabilidade do arco elétrico.

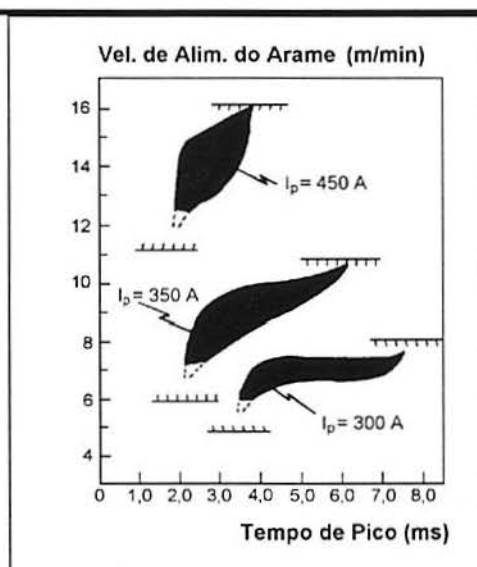


Fig.29: Zonas de estabilidade em função da velocidade de alimentação do arame, tempo e corrente de pico /46/.

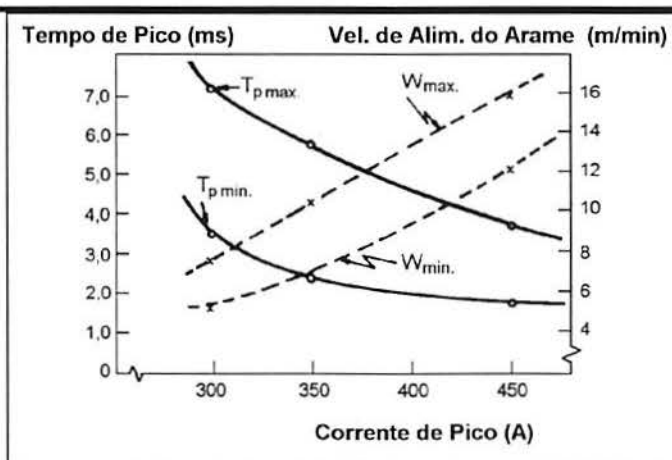


Fig.30: Relações dos parâmetros de pico I_p , T_p e a velocidade de alimentação do arame, para a obtenção de uma gota por período de pulso /46/.

5.3.3.- Influência dos Parâmetros de Pico para a Obtenção do Modo Axial-Projetado

Combinações dos valores ótimos dos parâmetros de pulso, I_p e T_p , para obter transferência axial-projetado semelhante ao modo aerossol projetado do processo convencional (Fig.3C), diminuem a quantidade de salpico produzido durante a soldagem. A Fig.31 ilustra a relação da corrente de pico (I_p) e o tempo de pico (T_p), ficando definida quatro regiões bem diferenciadas /52/:

♦ REGIÃO 1: A corrente de pico I_p é menor que I_{pmin} ($= 380$) A, sendo este o valor crítico para o arame de aço ao carbono de 1,2 mm de diâmetro, 15 mm de extensão do arame e gás de proteção Ar+20%CO₂, formando-se, assim, uma grande gota na ponta do arame, e independente do tempo de pico. O arco elétrico é instável, sendo acompanhado de muito salpico, pois a força eletromagnética aplicada na ponta do arame não está dirigida ao metal base.

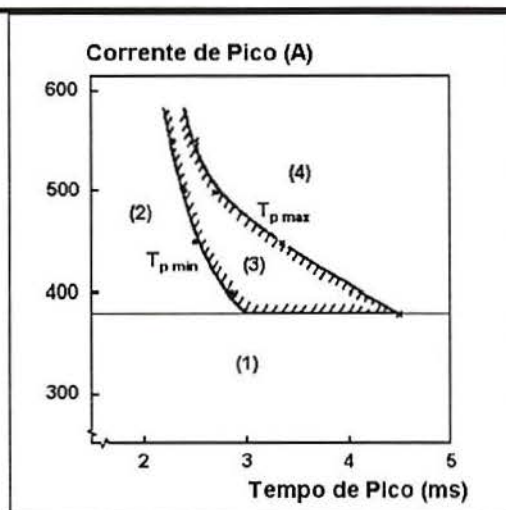


Fig.31: Classificação das regiões segundo o modo de transferência, no processo MIG/MAG pulsado, para diferentes combinação dos parâmetros de pico (I_p e T_p) /52/.

♦ REGIÃO 2: Está definida pelos valores de $I_p \geq I_{pmin}$ e $T_p < T_{pmin}$. A energia é muito baixa para destacar uma gota por pulso, então a gota formada é grande, mantendo-se na ponta do arame durante alguns período de pulso, até ser destacada sem controle algum.

♦ REGIÃO 3: Os limites são: $I_p \geq I_{pmin}$, e $T_{pmax} \geq T_p \geq T_{pmin}$, onde a gota formada tem diâmetro próximo ao do arame, transferido regularmente durante a aplicação da corrente de pico. Nesta região, o comportamento do arco é extremamente estável. Quando o comprimento do arco é maior ao equivalente a duas vezes o diâmetro do arame, dificilmente tocará a poça de fusão, e o salpico é eliminado, podendo-se aumentar bastante a velocidade de soldagem.

♦ REGIÃO 4: Quando $I_p > I_{pmin}$ e $T_p > T_{pmax}$. O modo de transferência tem aparência de axial-projetado. Porém, o metal fundido na ponta do arame é alongado, tocando o metal

base, e causa excessivo salpico. No entanto, com o aumento do tempo de pico nesta região, a frequência diminui, para uma velocidade de alimentação de arame constante, resultando em uma incessante flutuação no comprimento do arco.

5.3.4.- Modos de Transferência nos Processos MIG/MAG Convencional e Pulsado

♦ No processo MIG/MAG pulsado, utilizando arame de aço ao carbono de 1,2 mm de diâmetro, 20 mm de extensão do arame e gás de proteção Ar+20%CO₂, a gota é destacada intermitentemente, como se fossem projéteis. A gota formada na ponta do arame é quase estacionária, e sua forma é arredondada até um tempo $t_1 \approx 2,6$ ms, depois do início da aplicação da corrente de pico. Se o valor da corrente diminui, com a gota ainda na ponta do arame, já formado o pescoço, no tempo t_2 (≈ 2 ms de t_1), a gota se destaca. A parte de metal fundido remanescente na ponta do arame retoma sua forma esférica durante a aplicação da corrente de base /52/.

♦ No processo MIG/MAG convencional, utilizando arame de aço ao carbono de 1,2 mm de diâmetro, 20 mm de extensão do arame e gás de proteção Ar+20%CO₂, a quantidade de energia do arco é continuamente fornecido ao arame. Assim, o metal fundido é alongado na ponta do eletrodo, e a gota é destacada continuamente.

Os valores da corrente de transição, para correntes contínua e de pico, em função do diâmetro do arame, para os modos aerossol e axial-projetado, respectivamente, são mostrados na Fig.32. Ficando demonstrado que, no processo MIG/MAG pulsado, o valor da corrente de pico deve ser superior à corrente de transição globular-aerossol, do processo convencional, e T_p deve ser ajustado para obter o tamanho desejado da gota e destacar a cada período de pulso de corrente.

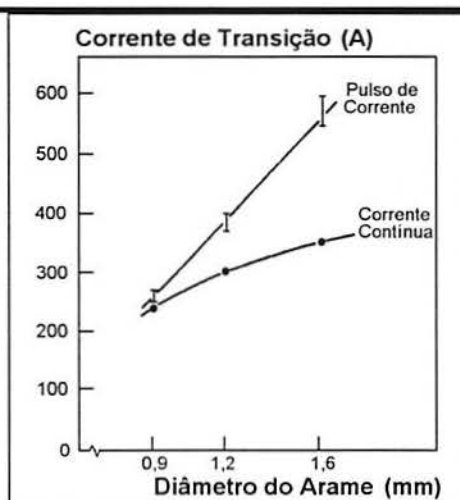


Fig.32: Relação entre a corrente de transição em função do diâmetro do arame, para correntes contínua e pulsado, e modos aerossol e axial-projetado, respectivamente /52/.

6.- TIPOS DE GASES DE PROTEÇÃO

6.1.- Generalidades

Os gases disponíveis para o processo MIG/MAG pulsado sinérgico, são à base de gases nobres, como argônio e hélio, contendo os agentes oxidantes O_2 e CO_2 , os quais são essenciais para estabilizar o arco na soldagem dos aços. O CO_2 puro não pode ser empregado, pois produz um arco instável e excesso de salpico.

6.1.1.- Discussão Sucinta dos Tipos de Gases Comerciais de Proteção

♦ Ar: É normalmente empregado como gás de proteção, no processo MIG, com pureza comercial de 99,95%, para soldagem de materiais reativos, tais como ligas de alumínio, magnésio, e titânio, onde é necessário evitar a entrada de ar ou gases que possam diminuir a qualidade do cordão de solda, bem como as propriedades da junta soldada.

♦ Ar + O_2 : Com até 2% O_2 no Ar, tem-se o modo de transferência axial-projetado, com o arco estável. Para superfícies menos tolerantes com a oxidação, e chapas finas, a mistura de gases normalmente empregada é Ar + 5% CO_2 + 2% O_2 .

♦ Ar + CO_2 : Argônio com adição de 5% CO_2 e 2% O_2 , são composições de gases preferidas, para o processo MIG/MAG com pulsos de corrente. Em fontes com valores de frequência de pulso inalterável, e concentrações superiores de CO_2 e O_2 , produzem um arco errático. O conteúdo máximo de CO_2 no Ar é de até 20% para fontes de energia transistorizadas, e especialmente com controle sinérgico.

Em aplicações gerais, a adição de CO_2 é preferida à de O_2 , devido a que o arco é menos estreito, obtendo-se cordão de solda de melhor aparência. Em materiais com espessuras até 6 mm, a mistura Ar + 5% CO_2 + 2% O_2 produz mínimo salpico. Para materiais de maior espessura, o conteúdo de CO_2 no Ar é maior; dessa forma é evitada a falta de fusão; porém, aumenta o nível de salpico. Essa é razão pela qual o conteúdo de CO_2 é até 15%, e o de O_2 até 2%, no Ar.

♦ He e Ar + He: Empregando He como gás de proteção, obtém-se o modo de transferência globular, e para valores de corrente de pico superiores a 500 A, o modo passa a ser axial-projetado. Até 70% de He é utilizado no processo pulsado, para obter transferência axial-projetado, com a vantagem do arco mais quente. Misturas de Ar + He são empregados na soldagem de alumínio e suas ligas, e outros materiais altamente reativo. Misturas de Ar + He aumentam a diluição e o reforço do cordão de solda resultante é menor. Para maior proporção de He, o arco torna-se mais estável. Porém, quando a corrente de soldagem é baixa, o arco é instável.

♦ Ar e He + O₂ ou CO₂: O₂ até 2% e CO₂ até 20% são normalmente empregados na soldagem de materiais industriais, como aço ao carbono e aço inoxidável. Condições de oxidação são necessárias para melhorar o enchimento da junta (pela maior fluidez do metal fundido) e a estabilidade do arco. Empregando mistura Ar + 35% He + 2% O₂, a gota se destaca com maior facilidade, sendo essa a combinação ideal para a transferência de massa e um ótimo controle da poça de fusão.

♦ A seleção da mistura de gases de proteção é baseada no custo e na qualidade desejada do cordão de solda. Às vezes, convém a utilização de gases mais caros, com os quais se obtém maiores benefícios, tais como, por exemplo, aumento na taxa de deposição e redução de reparos na solda. Para as ligas de aço inoxidável e de níquel, o custo do gás de proteção representa uma pequena fração do custo do metal base.

6.2.- Influência dos Gases de Proteção Sobre a Geometria do Cordão de Solda

Quintino *et al.* /53/ estudaram a influência dos gases de proteção, aplicando o critério de destacar uma gota por pulso, com volume equivalente uma esfera de diâmetro de 1,2 mm, para arame de aço de diâmetro 1,0, 1,2 e 1,6 mm. Os gases empregados foram de tipo comercial: Ar; Ar + 1%O₂; Ar + 2% O₂; Ar + 5% CO₂; Ar + 20% CO₂; CO₂; 75% He + 23% Ar + 2% CO₂. Os parâmetros do pulso foram $I_p = 350$ A; $T_p = 4$ ms; $I_m = 100$ A, para todas as combinações de diâmetro de arame-gases.

♦ Taxa de Fusão

O efeito da composição dos gases de proteção é pouco significativo sobre a taxa de fusão. Quando há mudança na composição do gás, para manter o modo de transferência, é necessário atuar sobre a tensão do arco, a qual apresenta ligeiro efeito sobre a taxa de fusão. Há um pequeno aumento na taxa de fusão, quando o valor da tensão é incrementado, para um mesmo diâmetro de arame. Segundo Waszink *et al.* /44/, o fenômeno de fusão do arame sofre grande influência da função trabalho e independe da composição do gás de proteção.

♦ Ângulo de Reforço do Cordão de Solda

A influência da composição do gás de proteção e da espessura da chapa sobre o ângulo de reforço do cordão de solda (δ) e valor médio da tensão do arco, é mostrada na Fig.33. Esses cordões de solda foram realizados fixando os valores dos seguintes parâmetros: corrente média $I_m = 100$ A, velocidade de soldagem $V_s = 1,53$ mm/s e energia de soldagem de 1,5 kJ/mm, combinando 7 misturas de gases e duas espessuras do metal base (25 e 6 mm). Um aumento da espessura do metal

base corresponde um aumento no ângulo de reforço do cordão de solda (δ). O aumento da tensão do arco elétrico produz uma redução no ângulo de reforço do cordão de solda (δ).

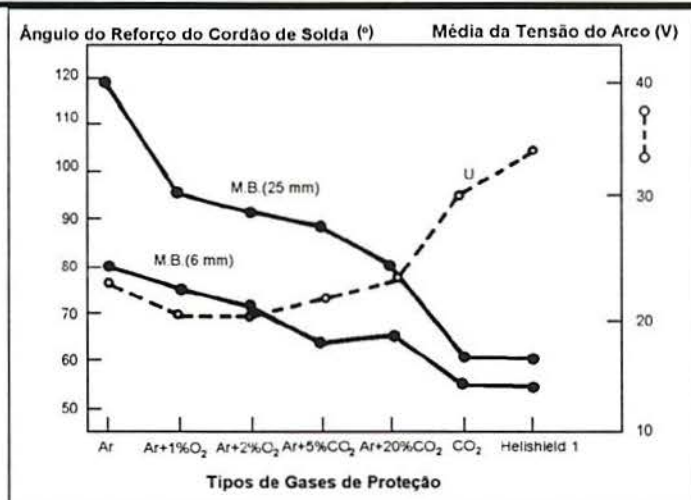


Fig.33: Influência da composição dos gases de proteção e espessura do metal base sobre o ângulo do reforço do cordão de solda. É mostrado, também, o valor médio da tensão do arco em função dos tipos de gases de proteção /54/.

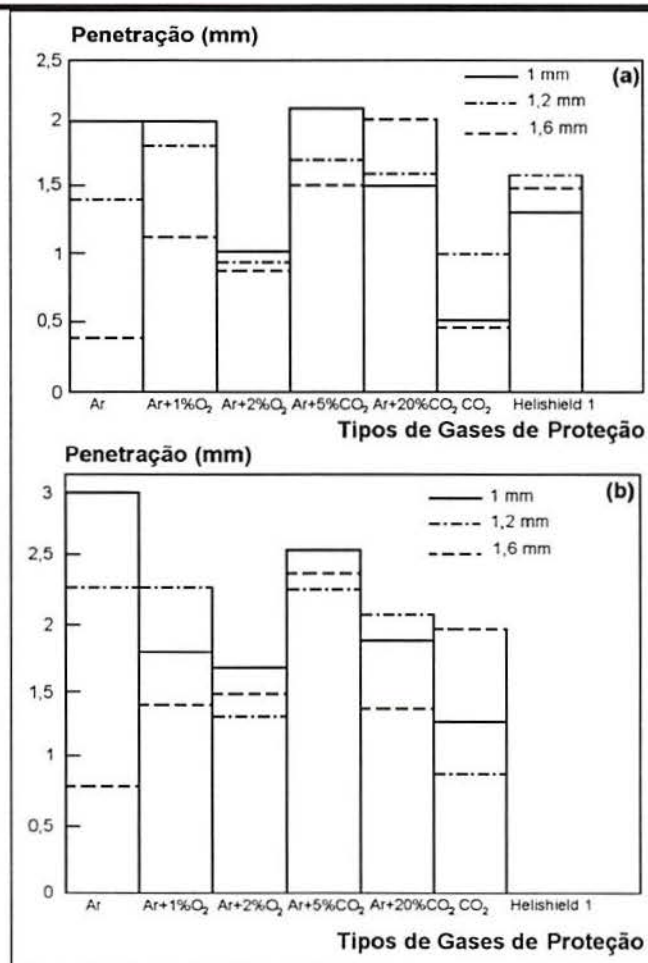


Fig.34: Influência da composição dos gases de proteção e do diâmetro do arame sobre a penetração do cordão de solda. a.- Metal base: 25 mm; b.- Metal base: 6 mm /54/.

♦ Penetração

Em geral, o efeito do diâmetro do arame é pequeno sobre a penetração. Porém, Quintino *et al.* /54/ observaram, que diminuindo o diâmetro do consumível, a penetração aumentava significativamente, como é mostrado na Fig.34. Talvez seja pela semelhança no volume da gota destacada por período de pulso, para os diferentes diâmetros de arame (1,0, 1,2 e 1,6 mm). A mistura de gases, bem como a espessura do metal base, influem sensivelmente sobre a penetração. O valor da penetração diminui quando o nível de O_2 no argônio é aumentado de 1% para 2%.

♦ Área Fundida do Metal Base

a.- Metal Base de 6 mm de Espessura: A tendência não foi bem definida. No entanto, a área fundida do metal base (M.B.) de 6 mm é maior do que do M.B. 25 mm. A mudança no diâmetro do arame teve ligeiro efeito sobre a área fundida do metal base. Quintino *et al.* /54/ salientam, que a mistura rica em He (Helishield 1) perfurou a chapa, para todos os diâmetros de arame (1,0, 1,2 e 1,6 mm). Para o M.B. (25 mm), o efeito do gás “Helishield 1” sobre a área fundida teve pequena variação, para estes diâmetros de arame (Fig.35a).

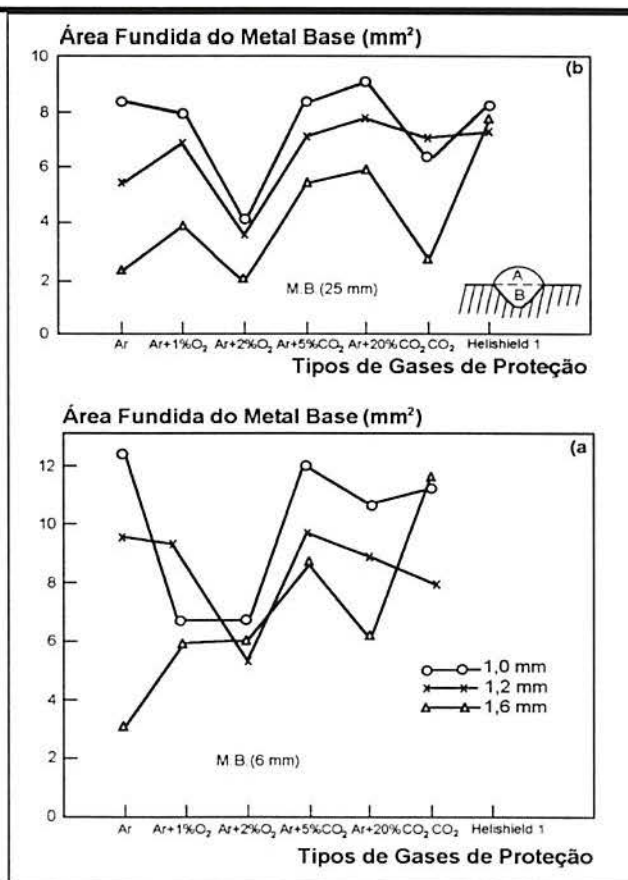


Fig.35: Efeito da composição dos gases de proteção e do diâmetro do arame sobre a área fundida do metal base. a.- Metal base: 25 mm; b.- Metal base: 6 mm /54/.

b.- Metal Base de 25 mm de Espessura: A área fundida do metal base é afetada significativamente pela redução no diâmetro do arame e pela composição dos gases de proteção (Fig.35b). Possivelmente, o efeito da força de convecção no arco seja maior para o arame de menor diâmetro. A área de fusão foi maior para os gases que contém CO₂, pois esse gás possui maior coeficiente de condução térmica do que o Ar e as misturas Ar + O₂ (Gases moleculares, tais como o CO₂ são “mais rentáveis energeticamente”).

♦ Eficiência de Fusão do Processo

A eficiência de fusão do processo ($0 \leq \eta_p(\%) \leq 100$) é definida como a porcentagem da energia de entrada à tocha da fonte de soldagem utilizada, para elevar a temperatura da massa até o ponto de fusão (onde $AB + AR$ é a área transversal total fundida, mm²), cuja equação é a seguinte:

$$\eta_p = \frac{h \cdot V_s \cdot (AB + AR)}{I_m \cdot U_m} \cdot 100\% \quad [6.1]$$

Onde:

V_s = Velocidade de soldagem;

I_m = Corrente média de soldagem;

U_m = Tensão média do processo.

Os valores médios da eficiência de fusão do processo, η_p , para os três diâmetros de arame e misturas ricas em argônio, estão no intervalo 32-36 %, conforme mostrado na Fig.36. Para o gás “Helishield 1”, o valor de η_p é menor, devido ao alto valor da tensão do arco, o que aumenta a perda de calor na coluna do mesmo /54/. Comportamento contrário foi observado por Niles *et al.* /55/, no processo TIG convencional, onde o valor de η_p é, geralmente, maior para o hélio utilizado como gás de proteção do que para o argônio. Porém, o principal resultado, é que somente cerca de 5% da energia do arco contribui para a fusão do metal base, e aproximadamente 7% em chapas finas até 6,4 mm de espessura.

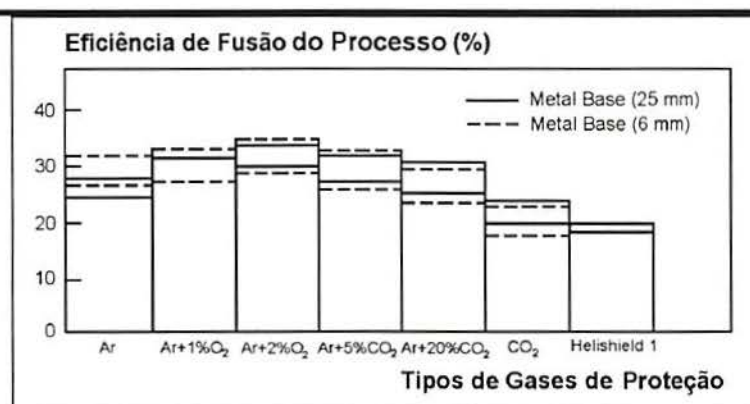


Fig.36: Eficiência de fusão do processo em função dos tipos de gases de proteção /54/.

7.- INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM SOBRE A GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA

Os efeitos dos parâmetros de soldagem sobre a característica de fusão, como a taxa de fusão, diluição, aporte de energia, etc., têm implicações metalúrgicas.

Allum *et al.* /56/, estudaram a influência da corrente média e da velocidade de soldagem - processo MIG/MAG pulsado- sobre as características de fusão, com os seguintes parâmetros: $s = 15$ mm; $I_m/F = 2$ A/Hz; $(I_p)^2 \cdot T_p = 490$ A².s; $K_1 = 0,27$ mm.A⁻¹.s⁻¹; $K_2 = 5,93 \cdot 10^{-5}$ A⁻².s⁻¹. Os autores apresentaram a seguinte relação entre esses parâmetros:

$$W = K_1 \cdot I_m + K_2 \cdot s \cdot D \cdot F \quad [7.1]$$

◆ Taxa de Fusão

Allum *et al.* /56/ determinaram, experimentalmente, a relação entre a velocidade de alimentação do arame em função da corrente média e da energia de soldagem, como mostra a Fig.37. Na mesma se observa, que para intensidade de corrente média maiores do que 150 A, há diferença nos valores obtidos e a reta representada pela equação [7.1]. Esse desvio, pode ser explicado pela não consideração do efeito Joule, devido à corrente de base I_b , na equação [7.1].

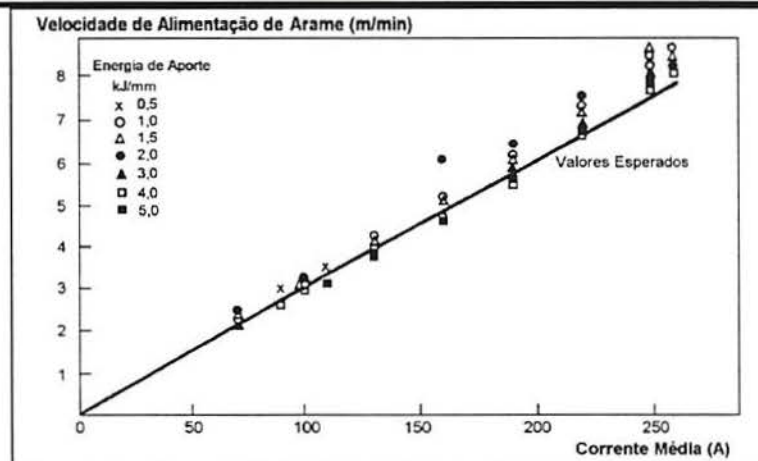


Fig.37: Relação entre a velocidade de alimentação do arame e a energia de soldagem, para diferentes valores de corrente média de soldagem /56/.

◆ Penetração

A influência da velocidade de soldagem sobre a penetração, para vários valores de corrente média, é mostrada na Fig.38. Para valores de velocidade de soldagem de 1,0 a 2,0 mm/s, a penetração aumenta quase 100%; quando a velocidade de soldagem está no intervalo de 2,0 a 8,0 mm/s, seu efeito torna-se pouco significativo. A máxima penetração ocorreu com 2,0 mm/s de velocidade de soldagem, e com os vários valores de correntes médias /56/.

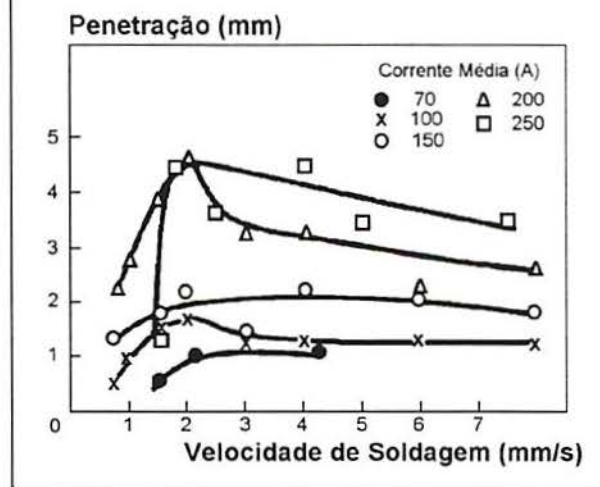


Fig.38: Influência da velocidade de soldagem sobre a penetração do cordão de solda, e vários valores de corrente média /56/.

♦ Diluição

A diluição (D), é definida pela relação entre a área fundida do metal base (AB) e o total da área fundida ($AB + AR$). Allum *et al.* /57/, através de modelo simples, sugerem a determinação da diluição em função do produto ($= I_m \cdot V_s$), para arame de aço ao carbono, $d = 1,2$ mm, gás de proteção: Ar + 5% CO_2 , que apresenta um comportamento praticamente constante para valores elevados de $I_m \cdot V_s$, (Fig.39). A combinação do diâmetro do arame e gás de proteção influi na diluição, com um ligeiro aumento quando o diâmetro do arame é maior, para uma mesma mistura de gases (Ar+5% CO_2). Também para a mistura contendo He, a penetração aumenta (Fig.40).

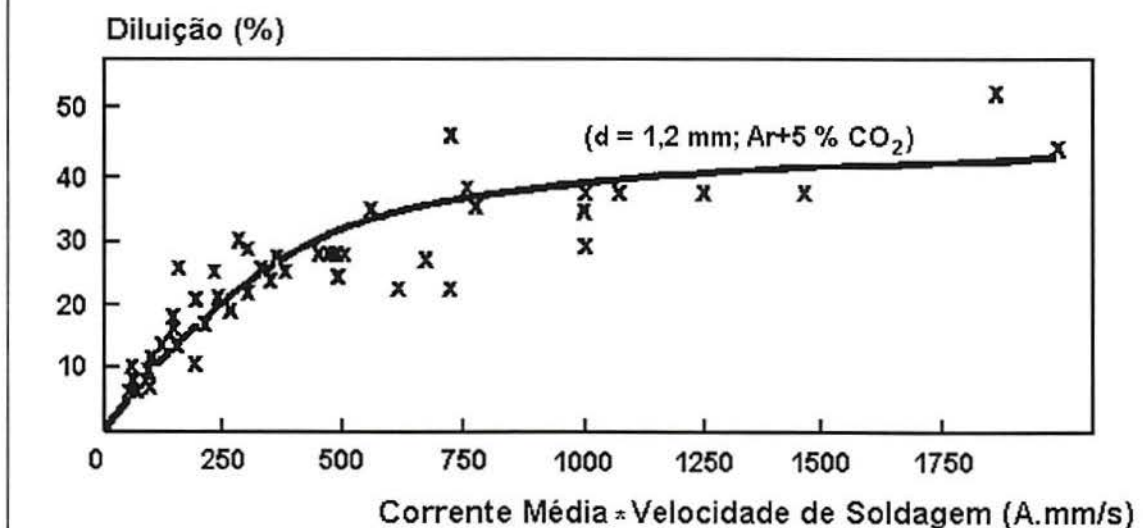


Fig.39: Efeito do produto da corrente média pela velocidade de soldagem sobre a diluição /57/.

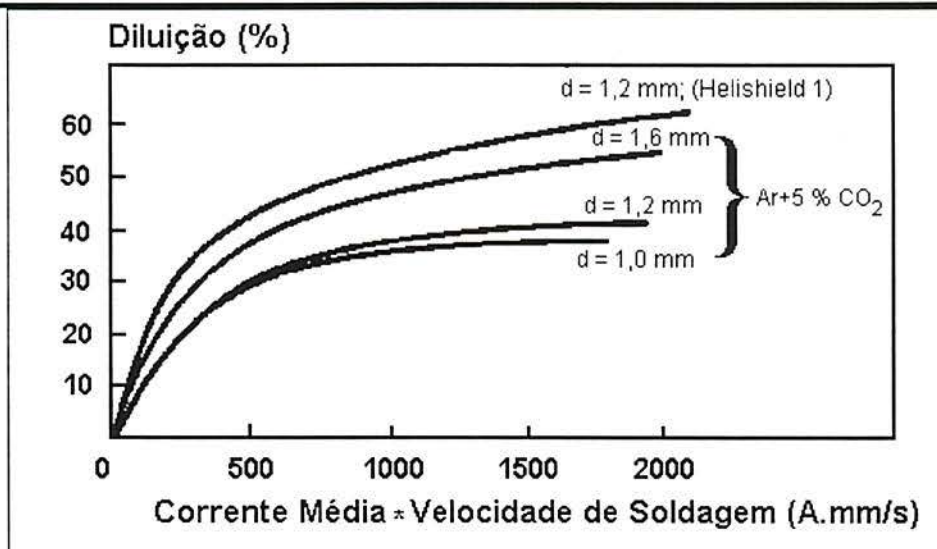


Fig.40: Efeito do produto da corrente média pela velocidade de soldagem, e vários diâmetros de arame sobre a diluição /57/.

♦ Ângulo do Reforço do Cordão de Solda

O efeito da velocidade de soldagem sobre o ângulo do reforço do cordão de solda (δ), para três valores de corrente média, aumenta quando a velocidade de soldagem é inferior a 3,0 mm/s. No entanto, para valores de velocidade de soldagem superior a 3,0 mm/s, o valor de δ diminui com o aumento da corrente média (Fig.41).

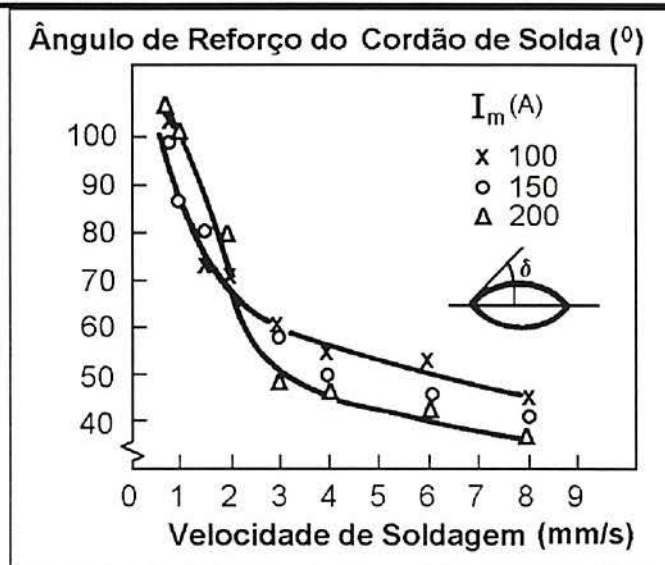


Fig.41: Efeito da corrente média e da velocidade de soldagem sobre o ângulo de reforço do cordão de solda /57/.

8.- CONTROLE SINÉRGICO

A equação generalizada foi proposta por Amin /58/, e é baseada na necessidade de balancear a velocidade de alimentação do arame com a taxa de fusão do mesmo, condição necessária para manter constante o comprimento do arco. A relação aproximada da corrente média (I_m) em função do fator de fusão do arame (m_{fa}), multiplicado pela velocidade de alimentação do arame (W) é dada por:

$$I_m = m_{fa} \cdot W \quad [8.1]$$

Quando a forma da onda é retangular, a corrente média está relacionada com os parâmetros do pulso da seguinte maneira:

$$I_m = \frac{I_p \cdot T_p + I_b \cdot T_b}{T_p + T_b} \quad [8.2]$$

$$I_e = I_p - I_b \quad [8.3]$$

$$F = \frac{I}{T_p + T_b} = \frac{I}{T} \quad [8.4]$$

$$I_m = I_b + I_e \cdot T_p \cdot F \quad [8.5]$$

Igualando [8.1] e [8.5] temos que:

$$m_{fa} \cdot W = I_b + I_e \cdot T_p \cdot F \quad [8.6]$$

Onde:

F = Frequência do pulso.

I_b = Corrente de base de soldagem;

I_e = Excesso de corrente de soldagem;

I_m = Corrente média de soldagem;

I_p = Corrente de pico ou amplitude do pulso de soldagem;

m_{fa} = Fator de fusão do arame;

T = Período do pulso ($T_p + T_b$) = $1/F$;

T_b = Tempo de base ou duração da corrente de base;

T_p = Tempo de pico ou duração da corrente de pico;

W = Velocidade de alimentação do arame.

Assim, na operação sinérgica, a corrente de base (I_b) e o produto ($I_e \cdot T_p \cdot F$) variam proporcionalmente com a velocidade de alimentação do arame.

Para o controle sinérgico, o produto ($I_e \cdot T_p \cdot F$) pode ser variado de três formas:

- ♦ Todos os fatores simultaneamente;

- ♦ Dois fatores variam e um terceiro é mantido constante;
- ♦ Variando um fator e mantendo constante os outros dois.

8.1.- Microcomputador no Controle Sinérgico

O controle sinérgico pode ser realizado utilizando-se um microcomputador, podendo variar um fator e manter constante os outros fatores, aumentando ou diminuindo a frequência do pulso (também a I_b), conforme varia a velocidade de alimentação do arame. Se os valores do excesso de corrente e tempo de pico são constantes, no intervalo desejado de velocidade de alimentação do arame, e são denotadas por (I_{eo}) e (T_{po}), respectivamente /58/. Os fatores de controle são:

$$I_b = I_{bo} \cdot W \quad [8.7]$$

$$F = F_o \cdot W \quad [8.8]$$

$$m_{fa} = I_{bo} + I_{eo} \cdot T_{po} \cdot F_o \quad [8.9]$$

I_{bo} e F_o são constantes de proporcionalidade, para a velocidade de alimentação do arame $W = 1$ m/min. Assim, têm-se:

$$I_m = I_{bo} \cdot W + I_{eo} \cdot T_{po} \cdot (F_o \cdot W) \quad [8.10]$$

A equação [8.10] tem uma variável independente, a qual é a velocidade de alimentação de arame (W).

O controle por meio do microcomputador precisa ter a capacidade de ajustar o comprimento do arco, geralmente, no intervalo prático de operação (2 a 20 mm). Esse controle é conseguido, introduzindo a variável “ L ” (comprimento do arco). Portanto, L varia a declividade (m_{fa}) da reta da taxa de fusão do arame:

$$m_{fa} = I_{bo} \cdot L + I_{eo} \cdot T_{po} \cdot (F_o \cdot L) \quad [8.11]$$

Introduzindo a variável “ L ” na equação [8.10], resulta:

$$I_m = (I_{bo} \cdot L) \cdot W + I_{eo} \cdot T_{po} \cdot (F_o \cdot L) \cdot W \quad [8.12]$$

A equação [8.12] tem duas variáveis independentes, que são W e L . Onde o controle é realizado da seguinte maneira:

- .- Para os valores dos parâmetros estabelecidos há um ponto de equilíbrio entre “ L ”, “ W ” e a fonte de soldagem;
- .- No entanto, se houver alguma alteração no comprimento do arco “ L ”, por exemplo: para um aumento de “ L ”, para retornar ao equilíbrio é necessário que a corrente média diminua, por conseguinte a taxa de fusão do arame, como se mostra na Fig.42.

Os parâmetros do pulso que determinam o valor da corrente média são:

- ♦ Frequência do pulso: $F = (F_o \cdot L) \cdot W$;
- ♦ Tempo de pico ou duração do pulso: $T_p = T_{po}$;
- ♦ Corrente de base: $I_b = (I_{bo} \cdot L) \cdot W$;
- ♦ Corrente de pulso: $I_p = I_b + I_{eo}$.

Para cada uma das combinações *Material do arame-Diâmetro do arame-Volume da gota*, devem ser determinadas as constantes paramétricas: I_{bo} , F_o , I_{eo} e T_{po} .

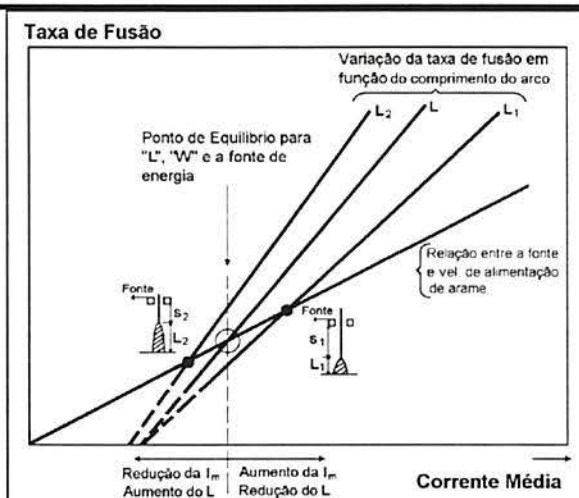


Fig.42: Efeito do comprimento do arco sobre a taxa de fusão do arame /47/.

8.2.- Lógicas no Controle Sinérgico

Para o processo MIG/MAG pulsado, existe uma relação muito importante entre a velocidade de alimentação do arame, igual à taxa de fusão em condições estáveis, e a corrente média de soldagem.

Geralmente, os sistemas de controle sinérgico são realizados atuando-se diretamente sobre a corrente média, que por sua vez atua sobre a taxa de fusão do arame, para manter constante tanto o comprimento do arco, quanto a velocidade de alimentação do arame.

No processo MIG/MAG pulsado sinérgico, as lógicas de controle são:

LÓGICA I: Os parâmetros mantidos constantes são: T_p e $I_e (=I_p - I_b)$, com as restantes variáveis: I_p, I_b, T_b (Fig.43a). A um incremento de I_p , corresponde um aumento no valor da corrente média. O tempo que a gota demora para ser separada (T_s) é função da corrente de pico e independe do tempo de pico Fig.44 /47/. Com isso, múltiplas gotas serão destacadas quando os valores da corrente e do tempo de pico são altos. Se os valores de I_p e T_p forem baixos, é esperada que a transferência da gota, aconteça durante a aplicação da corrente de base. Isso significa que o intervalo de corrente média não pode ser muito largo, pois o tamanho da gota

pode variar consideravelmente, limitando assim o intervalo de trabalho da corrente média no processo pulsado sinérgico.

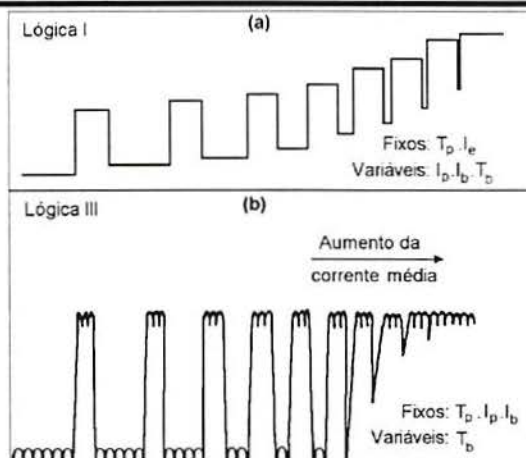


Fig.43: Lógicas de controle na fonte sinérgica. **a.-** Fixo: T_p, I_e e variável: I_p, I_b, T_b ; **b.-** Fixo: T_p, I_p, I_b e variável: T_b /47/.

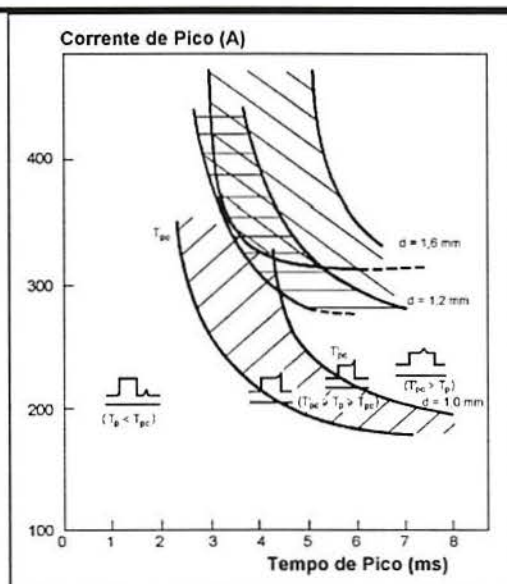


Fig.44: Relação entre os parâmetros de pico (I_p e T_p) sobre o tempo de separação da gota, para o arame de aço ao carbono e gás de proteção Ar+5%CO₂ /59/.

LÓGICA II: Variando o valor da corrente de pico e mantendo constantes a tensão de pico e a corrente de base ou CV/CC, o sistema de controle é bastante flexível, e é usado para arames maciço, ou tubular, e metais de adição como alumínio e suas ligas e aço inoxidável. A mudança na taxa de fusão é limitada pelo valor máximo de corrente de pico (I_{pmax}); e o mínimo (I_{pmin}) é determinado para obter o modo de transferência axial-projetado. A velocidade de resposta é relativamente baixa, mas o arco é muito estável. O valor de I_{pmin} deve ser suficiente para evitar outro modo de transferência que não seja axial-projetado /60/.

LÓGICA III: A duração da corrente de base é a única variável, permanecendo constantes os parâmetros T_p , I_p e I_b , como mostrado na Fig.43b.

O tamanho da gota pode ser modificado significativamente pelo seguinte motivo: o volume da gota é proporcional ao aumento no tempo de base [$v \cong A \cdot K \cdot (I_p \cdot T_p + I_b \cdot T_b)$]. Dificultando-se o controle do modo de transferência de massa, outro aspecto importante a considerar é a influência sobre a extensão do eletrodo, ou seja, no comprimento do arco, que pode ser analisado na Fig.42.

LÓGICA IV: A frequência $F = \frac{I}{T_p + T_b} = \frac{I}{T}$ é a variável independente. Esse sistema

de controle se aproxima mais ao do processo convencional, já que a corrente média varia para manter constante o comprimento (ou tensão) do arco, que pode ser analisado na Fig.42. Em geral, qualquer tipo de material de arame pode ser usado para realizar a solda, adaptando-se para arames de baixíssimo valor de resistência elétrica, tal como ligas de alumínio.

As respostas desse sistema foram melhoradas, empregando-se um sistema de retroalimentação, o qual estabelece o controle da variável dependente, constante para cada combinação *Material-Diâmetro do arame-Gás de proteção*. Com isso, a curva característica tem diferentes combinações para cada aplicação específica, melhorando a flexibilidade da fonte.

A lógica IV é semelhante à III, já que ambos têm efeito sobre a frequência do pulso. Na lógica IV não é especificado como se realiza o ajuste da frequência, pois se tem dois parâmetros de controle independentes T_p e T_b .

♦ Corrente de soldagem constante, sem controle do comprimento do arco, tem vantagens em algumas áreas. A técnica de controle CV/CC se adapta melhor para arame tubular, onde a alta taxa de resposta não é fator crítico.

8.3.- Características Gerais dos Parâmetros de Pulso

A condição da velocidade de alimentação de arame (W) está associada à combinação dos parâmetros do pulso, sendo que em continuação apresenta-se uma discussão sucinta dos parâmetros de controle:

♦ A corrente de pico (I_p) é o fator controlador da fusão e da transferência da gota. Em geral, seu valor selecionado é de 1,5 a 2 vezes o valor da corrente de transição globular-aerossol (projetado) do processo convencional, e duração de 2 a 4 ms /61/. A tendência é usar o tempo de pico o menor possível, para assim aumentar a frequência de trabalho e obter uma taxa de deposição maior.

♦ A frequência do pulso (F) é utilizada para controlar o valor da corrente média, onde, para cada pulso, deve corresponder uma quantidade discreta de material fundido e destacado. Também é usada para controlar a taxa de fusão, que depende da corrente média.

♦ A corrente de base (I_b) tem pouca influência sobre a fusão da gota, mas sua principal função é manter aceso o arco até o próximo pico (ou pulso). Também funciona como regulador da quantidade de massa de metal a fundir por cada período de pulso, sendo seu valor fixado para se obter um determinado tamanho de gota. A corrente de base é responsável por 1/3 a 1/4 do volume total de metal fundido e destacado /61/.

♦ A tensão do pulso, em geral, é usado para produzir “auto-ajustagem” do comprimento do arco elétrico.

Existem outros fatores que são características inerentes da fonte utilizada, e estão relacionados à dinâmica do pulso, os quais são:

♦ A taxa de resposta, que está associada à transição do pulso à base, e vice-versa, afeta a taxa de fusão do arame e dificulta a separação da gota do metal fundido. Quanto mais rápida é a transição da base para o pulso, e vice-versa, maior será a taxa de fusão /50, 60/. Há um valor de compromisso devido à capacidade tecnológica no valor da taxa de resposta, estando na faixa de 0,5 - 1,0 A/ μ s /61/.

♦ Outro fator importante é a ondulação, que é consequência da frequência de chaveamento do “choper”, baseado no projeto eletrônico.

8.4.- Controle da Taxa de Fusão do Arame

O controle da taxa de fusão do arame pode ser relacionando à frequência do pulso e à velocidade de alimentação do arame, que tem como principal objetivo destacar a mesma quantidade de material por período de pulso. Para baixa frequência, se tem baixo valor de corrente média, implicando uma baixa energia de soldagem. Quando aumenta a velocidade de alimentação do arame, a frequência deve ser incrementada, o que resulta num aumento da massa do metal fundido e destacado por unidade de tempo.

Ao mudar de material, é necessário estabelecer uma nova relação entre a velocidade de alimentação de arame e a frequência do pulso. Também é preciso otimizar os parâmetros de pico (I_p e T_p), para cada combinação *Material-Diâmetro do arame-Gás de proteção*.

A maioria das máquinas sinérgicas possuem um sistema lógico para o controle e ajuste do comprimento do arco. Quando ocorre alguma alteração no comprimento do arco, modificam-se os parâmetros de pulso para compensar o desajuste e retornar ao valor preestabelecido.

Existem outras técnicas para modificar a taxa de fusão, sendo que uma das alternativas é manter constante os parâmetros de pulso, e variar a velocidade de alimentação do arame, para compensar a variação do comprimento do arco. Este método não é muito conveniente, pois a resposta do sistema de alimentação de arame é lenta, dificultando ainda mais a estabilidade do arco.

8.5.- Controle Retro-Informação no Comprimento do Arco

Geralmente, a curva característica do processo MIG/MAG convencional é tensão constante (ou “plana”), e oferece um controle auto-ajustado do comprimento do arco. As fontes modernas possuem sistema de controle da tensão do arco, o qual depende do seu comprimento. Essa tensão é usada para o controle na seguinte sequência:

- ◆ Medir a tensão ou comprimento do arco;
- ◆ Comparar com a tensão de referência;
- ◆ Calcular a diferença entre o valor medido e o de referência;
- ◆ Calcular a mudança na fusão requerida para corrigir o comprimento do arco;
- ◆ Calcular o valor da corrente necessária para realizar o ajuste.

O processo descrito é de retroalimentação negativa, pois tende a corrigir a defasagem do valor antes estabelecido, mediante um ciclo fechado.

8.6.- Curvas Características da Fonte Pulsada

O tipo de controle das condições ótimas na corrente pulsada depende, fundamentalmente, do tipo de curva característica da fonte, ou seja:

◆ Tensão Constante ou Plana:

Qualquer alteração no comprimento do arco estabelecido, é compensada pela variação no valor da corrente base ou frequência do pulso. O valor da corrente de pico não se modifica, mas os outros parâmetros são reajustados, mantendo-se sempre a condição ótima de soldagem para cada caso. Assim, a velocidade de alimentação do arame se mantém constante.

◆ Corrente Constante ou Tombante:

A alteração no comprimento do arco é detectada por um sistema tensão-sensitivo, que atua sobre a velocidade de alimentação do arame, sem modificar os parâmetros de pulso, preservando a ótima combinação para cada situação. Como já foi dito, esse tipo de controle apresenta uma baixa taxa de resposta.

9.- FÓRMULAS MATEMÁTICAS PARA O PROCESSO MIG/MAG PULSADO

Até o presente, não foram apresentadas metodologias aceitáveis na determinação da potência e energia fornecida pela fonte quando são utilizados diferentes formas de onda de saída da fonte de soldagem durante a realização do cordão de solda. O mesmo também se aplica para a energia média de soldagem, usualmente conhecida como “energia de soldagem”. Portanto, foi preciso desenvolver equações que incluam as variáveis principais do processo MIG/MAG pulsado (corrente de soldagem, tensão do processo, velocidade de soldagem), os quais têm efeito significativo sobre as características de fusão.

9.1.- Função Periódica

Para que uma função contínua seja periódica, é necessário que a mesma satisfaça à seguinte condição:

$$f(t_0) = f(t_0 + T) \quad [9.1]$$

Onde:

$f(t)$ = Uma função contínua qualquer dependente do tempo;

t_0 = Tempo em um instante qualquer;

T = Período da função.

9.2.- Corrente Média de Soldagem

O valor médio da corrente de soldagem a partir dos valores instantâneos $i_{(i)}$, sendo $i_{(i)}$ uma função periódica, que se repete a cada T segundos, tem a seguinte forma:

$$I_m = \frac{1}{(i) \cdot T} \cdot \int_{t_0 + (i-1)T}^{t_0 + i \cdot T} i_{(t)} \cdot dt \quad (A) \quad 1 \leq i \leq m; i = 1, 2, \dots, m; m = 1, 2, \dots; \quad [9.2]$$

9.3.- Tensão Média do Processo de Soldagem

O valor médio da tensão do processo de soldagem a partir dos valores instantâneos $u_{(i)}$, sendo $u_{(i)}$ uma função que se repete a cada T segundos, tem a seguinte forma:

$$U_m = \frac{1}{(i) \cdot T} \cdot \int_{t_0 + (i-1)T}^{t_0 + i \cdot T} u_{(t)} \cdot dt \quad (V) \quad [9.3]$$

9.4.- Potência Instantânea do Sistema

A potência instantânea ($p_{(i)}$) fornecida ao sistema é igual ao produto dos valores instantâneos da tensão do processo ($u_{(i)}$) pela corrente de soldagem ($i_{(i)}$) que circula através do sistema, sendo representada pela seguinte equação:

$$p_{(t)} = i_{(t)} \cdot u_{(t)} \quad (\text{W}) \quad 0 \leq t(s) \leq t_1 \quad [9.4]$$

A função da potência instantânea ($p_{(t)}$) permite determinar os valores máximo, mínimo e médio da potência ao longo do tempo.

9.5.- Potência Média do Sistema

O valor médio da potência do sistema a partir dos valores instantâneos de $p_{(t)}$, sendo $p_{(t)}$ uma função periódica, tem a seguinte forma:

$$P_m = \frac{1}{(i) \cdot T} \cdot \int_{t_0 + (i-1)T}^{t_0 + (i)T} p_{(t)} \cdot dt = \frac{1}{(i) \cdot T} \cdot \int_{t_0 + (i-1)T}^{t_0 + (i)T} i_{(t)} \cdot u_{(t)} \cdot dt \quad (\text{W}) \quad [9.5]$$

9.6.- Energia

O acréscimo infinitesimal da energia absorvida (dE_a) pelo sistema pode ser determinada como:

$$dE_a = p_{(t)} \cdot dt = i_{(t)} \cdot u_{(t)} \cdot dt \quad (\text{J}) \quad [9.6]$$

O valor da energia (E_a) absorvida durante t_1 segundos, é obtida integrando-se a função $p_{(t)}$ no tempo t_1 , dado por:

$$E_a = \int_0^{t_1} p_{(t)} \cdot dt = \int_0^{t_1} i_{(t)} \cdot u_{(t)} \cdot dt \quad 0 \leq t(s) \leq t_1 \quad (\text{J}) \quad [9.7]$$

Se a função da potência for periódica, isto é $p_{(t)} = p_{(t+T)}$, a energia absorvida (E_a) durante $t_1 (= m \cdot T)$ é composta pela soma de m integrais da função $p_{(t)}$, como mostra a seguinte expressão:

$$E_a = T \cdot \left(\frac{1}{T} \cdot \int_0^T p_{(t)} \cdot dt + \frac{1}{T} \cdot \int_T^{2T} p_{(t)} \cdot dt + \dots + \frac{1}{T} \cdot \int_{(m-1)T}^{mT} p_{(t)} \cdot dt \right) \quad 0 \leq t(s) \leq t_1 (= m \cdot T) \quad (\text{J}) \quad [9.8]$$

Generalizando, a energia (E_a) absorvida pelo sistema, para o processo pulsado de soldagem utilizando funções periódicas ($p_{(t)}$), é calculada como o produto do valor da potência média (P_m) pelo tempo total (t_1) que foi fornecida a potência ao sistema:

$$E_a = T \cdot \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{T} \cdot \int_{(i-1)T}^{iT} i_{(t)} \cdot u_{(t)} \cdot dt \right) = T \cdot (m \cdot P_m) = t_1 \cdot P_m \quad 0 \leq t(s) \leq t_1 (= m \cdot T) \quad (\text{J}) \quad [9.9]$$

As equações [9.8] e [9.9] consideram a função da potência no período completo. A fórmula da energia quando a potência tem período fracionário não foi desenvolvida no presente trabalho, porque, nesse caso, no processo de soldagem, não apresenta interesse prático.

9.7.- Valor Eficaz (RMS)

O conceito de valor eficaz provém da capacidade de uma fonte de tensão (ou corrente) senoidal em fornecer potência a um resistor, equivalente em tensão (ou corrente) contínua durante o período de tempo T . Portanto, o objetivo é determinar o valor U_{ef} (ou I_{ef}) que forneça a mesma potência ao resistor, do seu equivalente em corrente contínua. A energia fornecida durante o tempo T tem a seguinte expressão:

$$E_a = P_m \cdot T \quad (J) \quad [9.10]$$

Quando o circuito elétrico contém somente elementos ôhmicos (passivos), a seguinte relação é válida:

$$u_{(t)} = R_{es} \cdot i_{(t)} \quad (V) \quad [9.11]$$

A potência média absorvida pelo resistor, R_{es} , pode ser expressa em função de:

a.- Corrente eficaz:

$$P_m = \frac{1}{(i) \cdot T} \cdot \int_{t_0+(i-1)T}^{t_0+(i)T} i_{(t)}^2 \cdot R_{es} \cdot dt = I_{ef}^2 \cdot R_{es} \quad (W) \quad [9.12]$$

Portanto, a corrente eficaz é dada pela expressão:

$$I_{ef}^2 = \frac{1}{(i) \cdot T} \cdot \int_{t_0+(i-1)T}^{t_0+(i)T} i_{(t)}^2 \cdot dt \quad (A) \quad [9.13]$$

b.- Tensão eficaz:

$$P_m = \frac{1}{(i) \cdot T} \cdot \int_{t_0+(i-1)T}^{t_0+(i)T} \frac{u_{(t)}^2}{R_{es}} \cdot dt = \frac{U_{ef}^2}{R_{es}} \quad (W) \quad [9.14]$$

Portanto, a tensão eficaz é dada por:

$$U_{ef}^2 = \frac{1}{(i) \cdot T} \cdot \int_{t_0+(i-1)T}^{t_0+(i)T} u_{(t)}^2 \cdot dt \quad (V) \quad [9.15]$$

Quando é possível obter os oscilogramas da corrente de soldagem e tensão do processo, a potência média do sistema pode ser calculada mediante a seguinte expressão:

$$P_m = \frac{1}{(i) \cdot T} \cdot \int_{t_0+(i-1)T}^{t_0+(i)T} p_{(t)} \cdot dt = \frac{1}{(i) \cdot T} \cdot \int_{t_0+(i-1)T}^{t_0+(i)T} i_{(t)} \cdot u_{(t)} \cdot dt \quad (W) \quad [9.16]$$

A equação [9.16] é útil quando o elemento do circuito elétrico tem um comportamento não ôhmico, o qual ocorre no arco elétrico do processo de soldagem. Portanto, para determinar o valor da potência média real é necessário obter a função $p_{(t)}$.

9.8.- Energia Média de Soldagem

A *energia média de soldagem* ou energia de soldagem é útil na avaliação dos efeitos metalúrgico/mecânicos da operação de soldagem sobre o material soldado e na comparação de diferentes procedimentos e processos de soldagem.

A energia média de soldagem (δE_a) é definida como a quantidade de energia fornecida ao sistema por unidade de comprimento de cordão de solda.

A Fig.45 mostra um esquema da sequência de energia infinitesimal fornecida pela fonte de soldagem ao sistema, compreendido entre o bico de contato e o metal base, e o comprimento infinitesimal do cordão de solda.

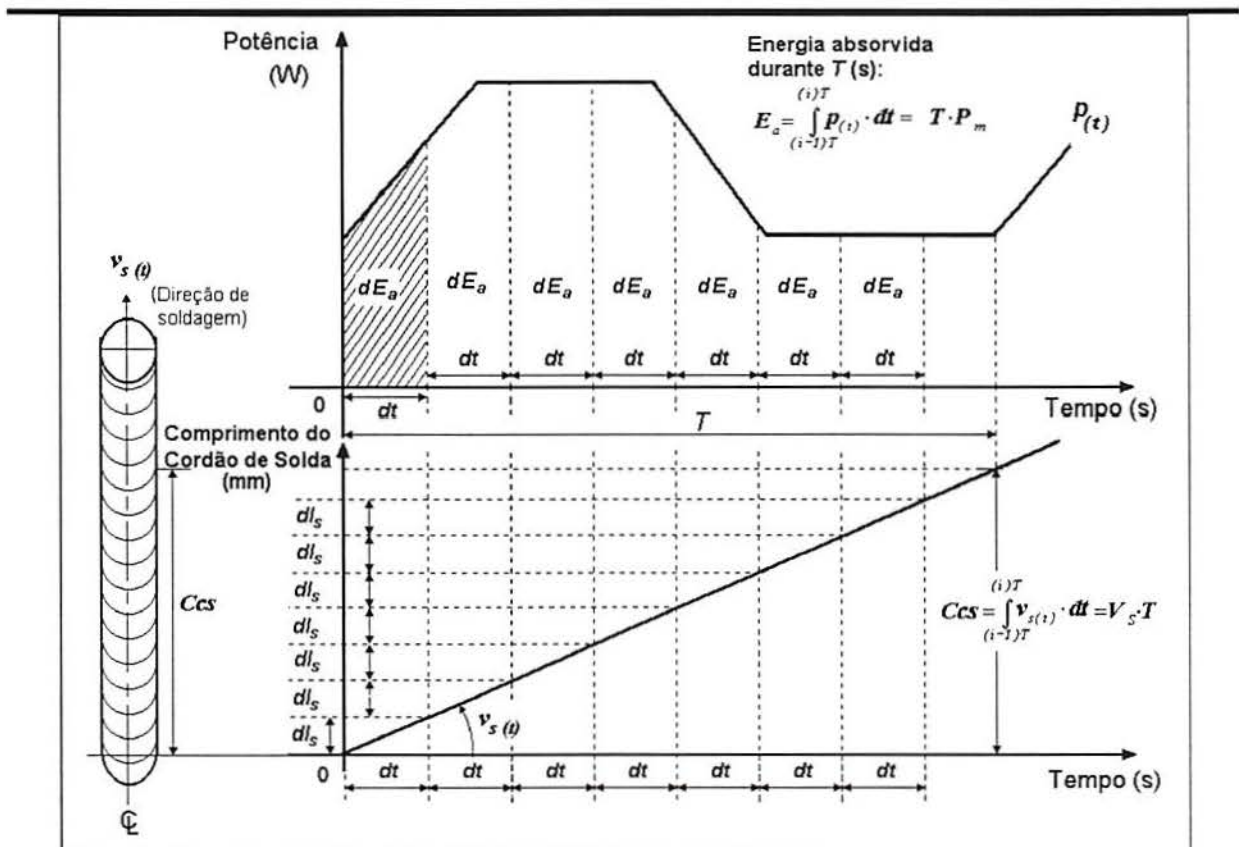


Fig.45: Esquematização da sequência da energia infinitesimal (dE_a) fornecida pela fonte de soldagem ao sistema, para um comprimento infinitesimal do cordão de solda (dl_s).

O acréscimo infinitesimal da energia por comprimento de cordão de solda $d(\delta E_a)$, pode ser escrito como:

$$d(\delta E_a) = \frac{d(\text{Energia})}{d(\text{Comp. do Cordão de Solda})} = \frac{dE_a}{dl_s} = \frac{P(t) \cdot dt}{dl_s} \quad (\text{J / mm}) \quad [9.17]$$

Onde a função $d(\delta E_a)$ depende de duas variáveis de controle que podem ser alteradas de forma independente, que facilita a determinação da integral da função $d(\delta E_a)$.

Supondo que a velocidade de soldagem (V_s) seja constante durante a realização do cordão de solda, tem-se:

$$\frac{dl_s}{dt} = v_{s(t)} = \text{Cte.} = V_s \text{ (mm/s)} \Rightarrow \begin{cases} 0 \leq dl_s \text{ (mm)} \leq Ccs \\ 0 \leq dt \text{ (s)} \leq t_I (= m \cdot T) \end{cases} \quad [9.18]$$

O comprimento do cordão de solda Ccs (mm) realizado durante m períodos de T segundos pode ser determinado mediante a seguinte expressão:

$$Ccs = \sum_{i=1}^m \left(\int_{(i-1)T}^{(i)T} v_{s(t)} \cdot dt \right) = \sum_{i=1}^m \left(\int_{(i-1)T}^{(i)T} V_s \cdot dt \right) = T \cdot m \cdot V_s = t_I \cdot V_s \quad (\text{mm}) \quad [9.19]$$

Da equação [9.9] pode-se calcular a energia (E_a) fornecida ao sistema para realizar um comprimento de cordão de solda (Ccs) durante t_I segundos.

A energia média de soldagem (δE_a) no tempo t_I (s) é obtida substituindo as equações [9.9] e [9.19] na integral da equação [9.17], resultando na seguinte expressão:

$$\delta E_a = \frac{E_a}{Ccs} = \frac{T \cdot \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{T} \cdot \int_{(i-1)T}^{(i)T} p_{(t)} \cdot dt \right)}{\sum_{i=1}^m \left(\int_{(i-1)T}^{(i)T} v_{s(t)} \cdot dt \right)} = \frac{T \cdot (m \cdot P_m)}{T \cdot m \cdot V_s} = \frac{P_m}{V_s} \quad (\text{J/mm}) \quad [9.20]$$

Na equação [9.20] demonstra-se que a energia média de soldagem (δE_a) está associada ao valor da potência média do sistema (P_m) e à velocidade de soldagem (V_s).

9.9.- Correntes Média e Eficaz das Diferentes Formas de Ondas

Foram desenvolvidas equações teóricas para o cálculo das correntes média e eficaz de soldagem, para as diferentes formas de onda utilizadas nesse trabalho.

Primeiramente são apresentadas as equações genéricas das correntes que compõem a função periódica ($i_{(t)}$). Depois, são desenvolvidas as equações das correntes média e eficaz em função de seus parâmetros (formas de onda).

As equações de corrente instantânea parcial que compõem um período (T), são as seguintes:

$$I_{b1} = I_b + m_1 \cdot t \quad t_0 + (i-1) \cdot T < t \leq t_0 + (i) \cdot T + T_1 \quad [9.21]$$

$$I_{p1} = I_p \quad t_0 + (i-1) \cdot T + T_1 < t \leq t_0 + (i) \cdot T + T_1 + T_2 \quad [9.22]$$

$$I_{p2} = i_p - m_2 \cdot t \quad t_0 + (i-1) \cdot T + T_1 + T_2 < t \leq t_0 + (i) \cdot T + T_1 + T_2 + T_3 \quad [9.23]$$

$$I_{b2} = I_b \quad t_0 + (i-1) \cdot T + T_1 + T_2 + T_3 < t \leq t_0 + (i) \cdot T + T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \quad [9.24]$$

$$m_1 = \left[\frac{\Delta I}{\Delta T} \right]_s = \frac{i_p - I_b}{T_1}; \quad -m_2 = -\left[\frac{\Delta I}{\Delta T} \right]_D = -\frac{i_p - I_b}{T_3} \quad [9.25]$$

Onde t_0 é o tempo no instante em que começa a atuar a corrente I_{bl} , para as formas de onda A1, A2, A3, A4, A5 e A7 (vide análise para cada tipo a seguir) o valor de $i_p = I_p$.

9.9.1.- Forma de Onda Retangular (A1)

A Fig.46 ilustra a forma de onda retangular (A1) com seus respectivos parâmetros.

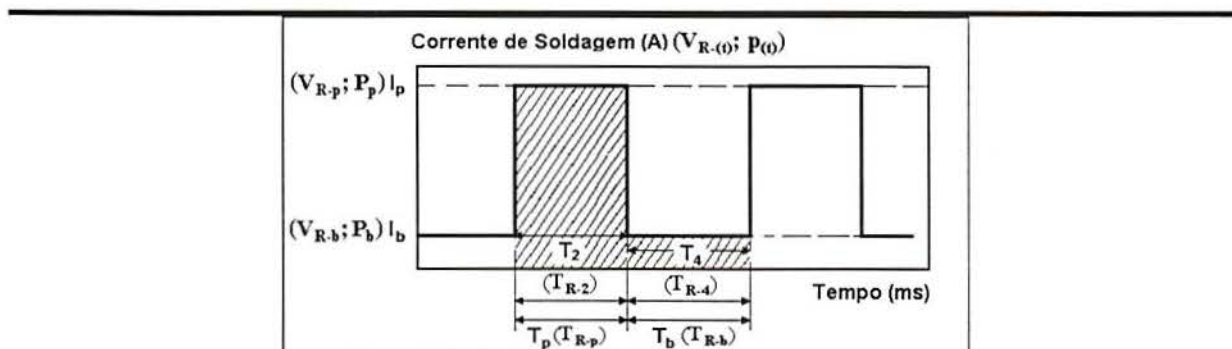


Fig.46: Parâmetros do pulso da corrente de soldagem (tensão de controle e potência do sistema), forma de onda retangular (A1).

a.- Corrente Média

$$I_m = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} i_{(t)} \cdot dt = \frac{1}{T} \cdot \left\{ \int_{t_0}^{t_0+T_2} I_p \cdot dt + \int_{t_0+T_2}^{t_0+T_2+T_4} I_b \cdot dt \right\} \quad [9.26]$$

Integrando a equação [9.26] no período T , tem-se que:

$$I_m = \frac{I_p \cdot T_2 + I_b \cdot T_4}{T_2 + T_4} \quad [9.27]$$

b.- Corrente Eficaz

$$I_{ef}^2 = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} i_{(t)}^2 \cdot dt = \frac{1}{T} \cdot \left\{ \int_{t_0}^{t_0+T_2} I_p^2 \cdot dt + \int_{t_0+T_2}^{t_0+T_2+T_4} I_b^2 \cdot dt \right\} \quad [9.28]$$

Integrando a equação [9.28] no período T , tem-se que:

$$I_{ef}^2 = \frac{I_p^2 \cdot T_2 + I_b^2 \cdot T_4}{T_2 + T_4} \quad [9.29]$$

9.9.2.- Forma de Onda Trapezoidal (A2)

A Fig.47 ilustra a forma de onda trapezoidal (A2) com seus respectivos parâmetros.

a.- Corrente Média

$$I_m = \frac{I}{T} \cdot \left\{ \int_{t_0}^{t_0+T_1} (I_b + m_1 \cdot t) \cdot dt + \int_{T_1}^{T_2} I_p \cdot dt + \int_{T_2}^{T_3} (I_p - m_2 \cdot t) \cdot dt + \int_{T_3}^{T_4} I_b \cdot dt \right\} \quad [9.30]$$

Integrando a equação [9.30] no período T , tem-se que:

$$I_m = \frac{I_p \cdot (T_2 + T_3) + I_b \cdot (T_1 + T_4)}{T_1 + T_2 + T_3 + T_4} + \frac{\left(\frac{\Delta I}{\Delta T} \right)_s \cdot \left(\frac{T_1^2}{2} \right) - \left(\frac{\Delta I}{\Delta T} \right)_d \cdot \left(\frac{T_3^2}{2} \right)}{T_1 + T_2 + T_3 + T_4} \quad [9.31]$$

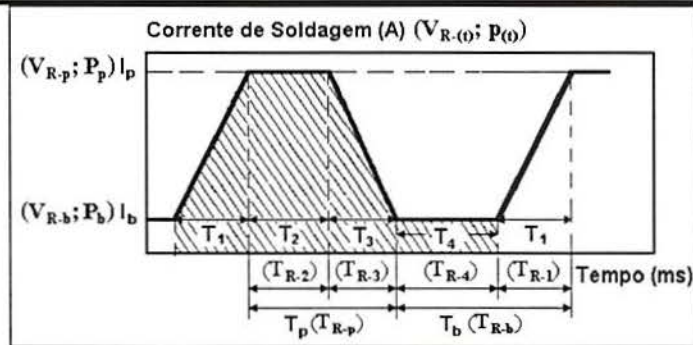


Fig.47: Parâmetros do pulso da corrente de soldagem (tensão de controle e potência do sistema), forma de onda trapezoidal (A2).

b.- Corrente Eficaz

$$I_{ef}^2 = \frac{I}{T} \cdot \left\{ \int_{t_0}^{t_0+T_1} (I_b + m_1 \cdot t)^2 \cdot dt + \int_{T_1}^{T_2} I_p^2 \cdot dt + \int_{T_2}^{T_3} (I_p - m_2 \cdot t)^2 \cdot dt + \int_{T_3}^{T_4} I_b^2 \cdot dt \right\} \quad [9.32]$$

Integrando a equação [9.32] no período T , tem-se que:

$$I_{ef}^2 = \frac{I_p^2 \cdot (T_2 + T_3) + I_b^2 \cdot (T_1 + T_4)}{T_1 + T_2 + T_3 + T_4} + \frac{\left(\frac{\Delta I}{\Delta T} \right)_s \cdot \frac{T_1^2}{3} \cdot \left(3 \cdot I_b + \left(\frac{\Delta I}{\Delta T} \right)_s \cdot T_1 \right)}{T_1 + T_2 + T_3 + T_4} + \frac{\left(\frac{\Delta I}{\Delta T} \right)_d \cdot \frac{T_3^2}{3} \cdot \left(-3 \cdot I_p + \left(\frac{\Delta I}{\Delta T} \right)_d \cdot T_3 \right)}{T_1 + T_2 + T_3 + T_4} \quad [9.33]$$

9.9.3.- Forma de Onda Dente de Serra (A3)

A Fig.48 ilustra a forma de onda dente de serra (A3) com seus respectivos parâmetros.

a.- Corrente Média

$$I_m = \frac{I}{T} \cdot \left\{ \int_{t_0}^{t_0+T_1} (I_b + m_1 \cdot t) \cdot dt + \int_{T_1}^{T_2} I_b \cdot dt \right\} \quad [9.34]$$

Integrando a equação [9.34] no período T , tem-se que:

$$I_m = I_b + \frac{\left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right)_s \cdot \left(\frac{T_I^2}{2}\right)}{T_I + T_A} \quad [9.35]$$

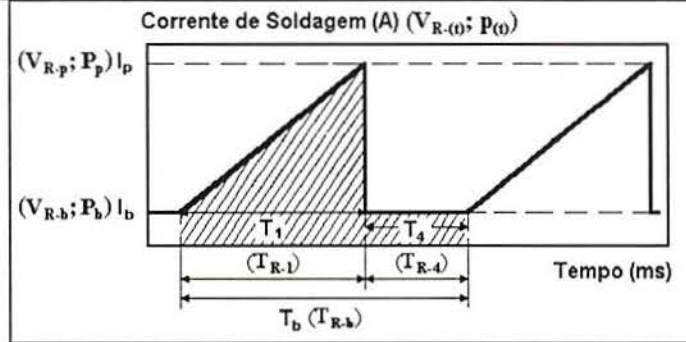


Fig.48: Parâmetros do pulso da corrente de soldagem (tensão de controle e potência do sistema), forma de onda dente de serra (A3).

b.- Corrente Eficaz

$$I_{ef}^2 = \frac{I}{T} \cdot \left\{ \int_{t_0}^{t_0+T_I} (I_b + m_I \cdot t)^2 \cdot dt + \int_{T_I}^{T_I+T_A} I_b^2 \cdot dt \right\} \quad [9.36]$$

Integrando a equação [9.36] no período T , tem-se que:

$$I_{ef}^2 = I_b^2 + \frac{\left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right)_s \cdot \frac{T_I^2}{3} \cdot \left(3 \cdot I_b + \left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right)_s \cdot T_I\right)}{T_I + T_A} \quad [9.37]$$

9.9.4.- Forma de Onda Composta Crescente (A4)

A Fig.49 ilustra a forma de onda composta crescente (A4) com seus respectivos parâmetros.

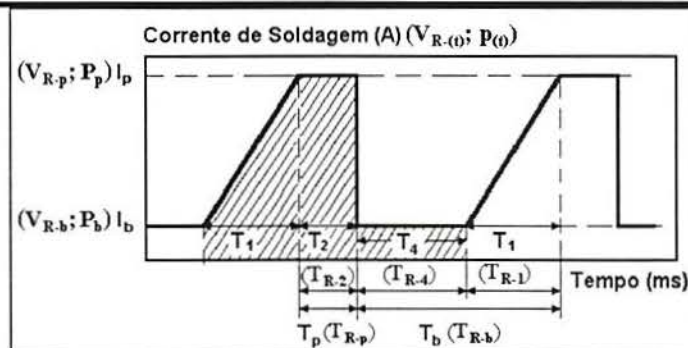


Fig.49: Parâmetros do pulso da corrente de soldagem (tensão de controle e potência do sistema), forma de onda composta crescente (A4).

a.- Corrente Média

$$I_m = \frac{I}{T} \cdot \left\{ \int_{t_0}^{t_0+T_1} (I_b + m_1 \cdot t) \cdot dt + \int_{T_1}^{T_2} I_p \cdot dt + \int_{T_2}^{T_4} I_b \cdot dt \right\} \quad [9.38]$$

Integrando a equação [9.38] no período T , tem-se que:

$$I_m = \frac{I_p \cdot T_2 + I_b \cdot (T_1 + T_4)}{T_1 + T_2 + T_4} + \frac{\left(\frac{\Delta I}{\Delta T} \right)_s \cdot \left(\frac{T_1^2}{2} \right)}{T_1 + T_2 + T_4} \quad [9.39]$$

b.- Corrente Eficaz

$$I_{ef}^2 = \frac{I}{T} \cdot \left\{ \int_{t_0}^{t_0+T_1} (I_b + m_1 \cdot t)^2 \cdot dt + \int_{T_1}^{T_2} I_p^2 \cdot dt + \int_{T_2}^{T_4} I_b^2 \cdot dt \right\} \quad [9.40]$$

Integrando a equação [9.40] no período T , tem-se que:

$$I_{ef}^2 = \frac{I_p^2 \cdot T_2 + I_b^2 \cdot (T_1 + T_4)}{T_1 + T_2 + T_4} + \frac{\left(\frac{\Delta I}{\Delta T} \right)_s \cdot \frac{T_1^2}{3} \cdot \left(3 \cdot I_b + \left(\frac{\Delta I}{\Delta T} \right)_s \cdot T_1 \right)}{T_1 + T_2 + T_4} \quad [9.41]$$

9.9.5.- Forma de Onda Composta Decrescente (A5)

A forma de onda composta decrescente encontra-se ilustrada na Fig.50.

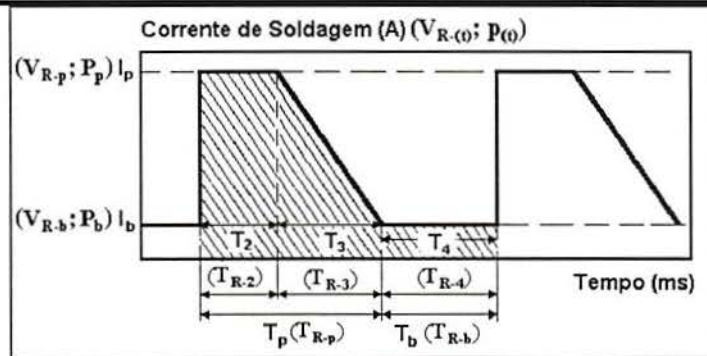


Fig.50: Parâmetros do pulso da corrente de soldagem (tensão de controle e potência do sistema), forma de onda composta decrescente (A5).

a.- Corrente Média

$$I_m = \frac{I}{T} \cdot \left\{ \int_t^{t_0+T_2} I_p \cdot dt + \int_{T_2}^{T_3} (I_p - m_2 \cdot t) \cdot dt + \int_{T_3}^{T_4} I_b \cdot dt \right\} \quad [9.42]$$

Integrando a equação [9.42] no período T , tem-se que:

$$I_m = \frac{I_p \cdot (T_2 + T_3) + I_b \cdot T_4}{T_2 + T_3 + T_4} - \left(\frac{\Delta I}{\Delta T} \right)_D \cdot \left(\frac{T_3^2}{2} \right) \quad [9.43]$$

b.- Corrente Eficaz

$$I_{ef}^2 = \frac{I}{T} \cdot \left\{ \int_{t_0}^{t_0+T_2} I_p^2 \cdot dt + \int_{T_2}^{T_3} (I_p - m_2 \cdot t)^2 \cdot dt + \int_{T_3}^{T_4} I_b^2 \cdot dt \right\} \quad [9.44]$$

Integrando a equação [9.44] no período T , tem-se que:

$$I_{ef}^2 = \frac{I_p^2 \cdot (T_2 + T_3) + I_b^2 \cdot T_4}{T_2 + T_3 + T_4} + \frac{\left(\frac{\Delta I}{\Delta T} \right)_D \cdot \frac{T_3^2}{3} \cdot \left(-3 \cdot I_p + \left(\frac{\Delta I}{\Delta T} \right)_D \cdot T_3 \right)}{T_2 + T_3 + T_4} \quad [9.45]$$

9.9.6.- Forma de Onda Combinada: retangular-trapezoidal (A6)

A Fig.51 ilustra a forma de onda combinada (A6) com seus respectivos parâmetros.

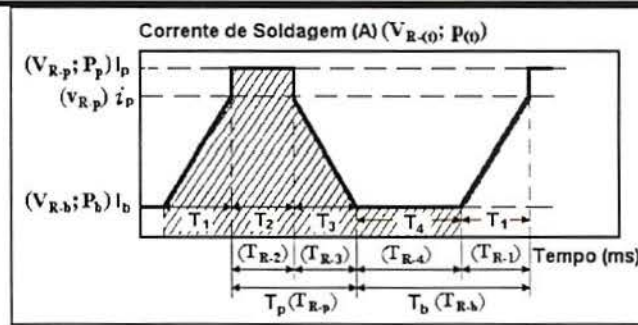


Fig.51: Parâmetros do pulso da corrente de soldagem (tensão de controle e potência do sistema), forma de onda combinada retangular- trapezoidal (A6).

a.- Corrente Média

$$I_m = \frac{I}{T} \cdot \left\{ \int_{t_0}^{t_0+T_1} (I_b + m_1 \cdot t) \cdot dt + \int_{T_1}^{T_2} I_p \cdot dt + \int_{T_2}^{T_3} (i_p - m_2 \cdot t) \cdot dt + \int_{T_3}^{T_4} I_b \cdot dt \right\} \quad [9.46]$$

Integrando a equação [9.46] no período T , tem-se que:

$$I_m = \frac{I_p \cdot T_2 + i_p \cdot T_3 + I_b \cdot (T_1 + T_4)}{T_1 + T_2 + T_3 + T_4} + \frac{\left(\frac{\Delta I}{\Delta T} \right)_S \cdot \left(\frac{T_1^2}{2} \right) - \left(\frac{\Delta I}{\Delta T} \right)_D \cdot \left(\frac{T_3^2}{2} \right)}{T_1 + T_2 + T_3 + T_4} \quad [9.47]$$

b.- Corrente Eficaz

$$I_{ef}^2 = \frac{I}{T} \cdot \left\{ \int_{t_0}^{t_0+T_1} (I_b + m_1 \cdot t)^2 \cdot dt + \int_{T_1}^{T_2} I_p^2 \cdot dt + \int_{T_2}^{T_3} (i_p - m_2 \cdot t)^2 \cdot dt + \int_{T_3}^{T_4} I_b^2 \cdot dt \right\} \quad [9.48]$$

Integrando a equação [9.48] no período T , tem-se que:

$$I_{ef}^2 = \frac{I_p^2 T_2 + i_p^2 T_3 + I_b^2 (T_1 + T_4)}{T_1 + T_2 + T_3 + T_4} + \frac{\left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right)_s \cdot \frac{T_1^2}{3} \cdot \left(3 \cdot I_b + \left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right)_s T_1\right)}{T_1 + T_2 + T_3 + T_4} + \frac{\left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right)_d \cdot \frac{T_3^2}{3} \cdot \left(-3 \cdot i_p + \left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right)_d T_3\right)}{T_1 + T_2 + T_3 + T_4} \quad [9.49]$$

9.9.7.- Forma de Onda Triangular (A7)

A Fig.52 mostra a forma de onda triangular (A7) com seus respectivos parâmetros.

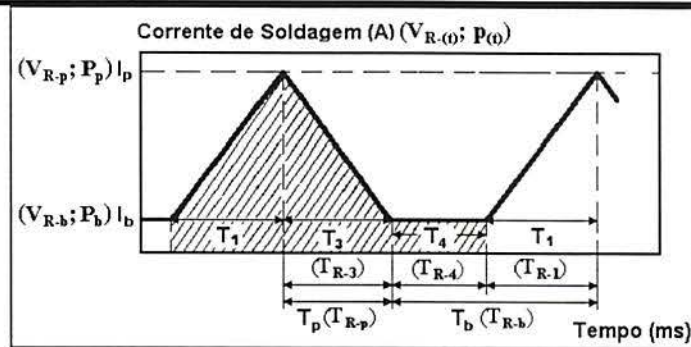


Fig.52: Parâmetros do pulso da corrente de soldagem (tensão de controle e potência do sistema), forma de onda triangular (A7).

a.- Corrente Média

$$I_m = \frac{I}{T} \cdot \left\{ \int_{t_0}^{t_0+T_1} (I_b + m_1 \cdot t) \cdot dt + \int_{T_1}^{T_1+T_3} (I_p - m_2 \cdot t) \cdot dt + \int_{T_1+T_3}^{T_1+T_3+T_4} I_b \cdot dt \right\} \quad [9.50]$$

Integrando a equação [9.50] no período T , tem-se que:

$$I_m = \frac{I_p T_3 + I_b (T_1 + T_4)}{T_1 + T_3 + T_4} + \frac{\left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right)_s \cdot \left(\frac{T_1^2}{2}\right) - \left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right)_d \cdot \left(\frac{T_3^2}{2}\right)}{T_1 + T_3 + T_4} \quad [9.51]$$

b.- Corrente Eficaz

$$I_{ef}^2 = \frac{I}{T} \cdot \left\{ \int_{t_0}^{t_0+T_1} (I_b + m_1 \cdot t)^2 \cdot dt + \int_{T_1}^{T_1+T_3} (I_p - m_2 \cdot t)^2 \cdot dt + \int_{T_1+T_3}^{T_1+T_3+T_4} I_b^2 \cdot dt \right\} \quad [9.52]$$

Integrando a equação [9.52] no período T , tem-se que:

$$I_{ef}^2 = \frac{I_p^2 T_3 + I_b^2 (T_1 + T_4)}{T_1 + T_3 + T_4} + \frac{\left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right)_s \cdot \frac{T_1^2}{3} \cdot \left(3 \cdot I_b + \left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right)_s \cdot T_1\right)}{T_1 + T_3 + T_4} + \frac{\left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right)_d \cdot \frac{T_3^2}{3} \cdot \left(-3 \cdot I_p + \left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right)_d \cdot T_3\right)}{T_1 + T_3 + T_4}$$

[9.53]

9.10.- Tensão do Processo de Soldagem

9.10.1.- Processo MIG/MAG Convencional

A tensão no processo MIG/MAG convencional utilizando eletrodo com polaridade positiva (CCEP), é formada pelos seguintes componentes principais, como se mostra na Fig.53:

- .- Bico de contato;
- .- Arame (eletrodo consumível);
- .- Região da queda de tensão do ânodo;
- .- Arco elétrico (coluna ou plasma);
- .- Região da queda de tensão do cátodo;
- .- Metal base (poça de fusão).

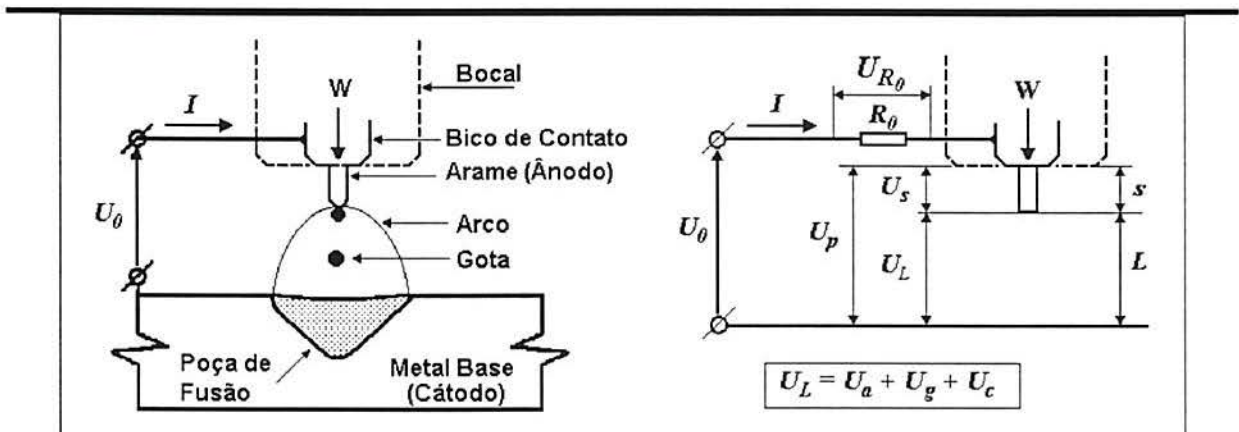


Fig.53: Quedas de tensão no processo MIG/MAG convencional, eletrodo positivo (CCEP).

A queda de tensão entre o bico de contato e metal base pode ser dividido nas seguintes quedas parciais:

- 1.- U_{R_0} = Queda de tensão devido à resistência elétrica de contato entre o bico de contato e o arame;
- 2.- U_s = Queda de tensão devido à extensão de arame;
- 3.- U_a = Queda de tensão devido ao ânodo;

4.- U_c = Queda de tensão devido ao cátodo;

5.- U_g = Queda de tensão devido ao arco elétrico (coluna ou plasma).

A continuação apresenta uma breve discussão de estudos feitos até o presente, tratando das quedas parciais de tensão. Para o caso em que não há informação (ou estudo) disponível para o processo MIG/MAG convencional, será incluída análise complementar referente a outro processo de soldagem ao arco elétrico.

9.10.1.1.- Queda de Tensão Devido à Resistência Elétrica de Contato (U_{R_0})

Waszink *et al.* /44/ determinaram experimentalmente a queda de tensão devido à resistência de contato entre o bico de contato e o arame, para o aço ao carbono e o aço inoxidável. O valor da queda de tensão medido foi de 0,3 a 0,6 V, para corrente de soldagem de 100 a 250 A, comprimento do arco de 6 a 10 mm e extensão do arame de 27,5 a 37,5 mm.

9.10.1.2.- Queda de Tensão Devido à Extensão de Arame (U_s)

Halmφy /45, 62/ apresentou uma relação para a queda de tensão do processo MIG/MAG convencional, como segue:

$$U_s = \frac{H_0 \cdot W}{j} - \phi \quad [9.54]$$

Onde:

H_0 = Constante experimental que representa o total de energia por unidade de volume necessária para fundir o arame e destacar a gota;

W = Velocidade de alimentação do arame;

ϕ = Função trabalho que depende da composição química do material do arame;

j = Densidade de corrente de soldagem.

A queda de tensão na extensão do arame também foi estudada por Waszink *et al.* /44/, e os valores obtidos são de 4,0 a 4,5 V para corrente de soldagem de 150 A, velocidade de alimentação do arame de 4,44 m/min e com extensão do arame de 37,5 mm.

9.10.1.3.- Queda de Tensão Devido ao Ânodo (U_a)

A queda de tensão no ânodo ocorre em uma fina camada onde não existe equilíbrio térmico. Para o processo TIG autógeno de soldagem, a temperatura das partículas pesadas (íons, átomos, moléculas) rapidamente aproxima-se da temperatura do ânodo, enquanto que a temperatura dos elétrons permanece elevada para assim manter a condução ainda bastante próxima da superfície anódica /63/.

A camada máxima da região anódica, no qual o efeito de desequilíbrio térmico local é confinado, foi determinada experimentalmente com valores de 0,05 a 0,1 mm para o carbono /64, 65/.

A queda de tensão no ânodo para metais, utilizando Ar como gás de proteção, foi medida e estimada no intervalo de 1 a 11 V, para corrente de 50 a 500 A /66-69/. Nesses estudos, a tensão anódica diminui quando a corrente ou a temperatura próxima do ânodo aumenta devido à redução no comprimento do arco elétrico /66, 69/. Em outro estudo /70/, a queda de tensão no ânodo diminui com o decréscimo da condutividade térmica do metal base. Finalmente, há estudos onde o valor estimado da queda de tensão no ânodo é negativo /71, 72/. Todos os estudos foram realizados utilizando-se o processo TIG autógeno de soldagem. Até o presente, tanto quanto se sabe, não há trabalhos similares no que diz respeito ao processo MIG/MAG convencional ou pulsado.

9.10.1.4.- Queda de Tensão Devido ao Cátodo (U_c)

A região do cátodo tem comportamento similar à do ânodo, para o processo TIG autógeno, onde os elétrons são responsáveis pela condutividade elétrica /73-75/. A máxima espessura da camada da região catódica foi determinada experimentalmente como 0,1 mm, para cátodo termoiônico encontrado no processo TIG /64/. O cátodo é definido como termoiônico, quando aquecido à uma suficientemente alta temperatura emite elétrons sem fundir.

Até o presente, existem poucos estudos sobre a queda de tensão na região catódica, para o processo MIG/MAG convencional. Lancaster /17/ por exemplo, determinou o valor da tensão na região catódica em 15 V para uma corrente de soldagem de 118 A, para MIG/MAG, utilizando arame de aço ao carbono. Esse valor foi obtido a partir dos estudos realizados por Pintard /76/, que mediu uma tensão de 19 V para um comprimento de arco zero, supondo as quedas de tensão da extensão do arame e região anódica, de 2 V. Outro dado de tensão da região catódica, válido para o arco elétrico em geral, é dado por Guile /77/, com valores de 10 a 20 V. Vijn /78/ calculou o valor da queda de tensão na região catódica, para o ferro puro, o valor de 16,2 V. Este valor é aproximado ao valor experimental de 17,1 a 18,0 V, determinado por Grakov /79/, para valores de corrente na faixa de 5 a 25 A.

9.10.1.5.- Queda de Tensão Devido ao Arco Elétrico (U_g)

Devido à complexa natureza do arco elétrico na prática, é muito difícil medir a tensão do arco elétrico. Jönsson *et al.* /80/ demonstraram que a principal queda de tensão do processo ocorre no arco elétrico e tem efeito significativo na geração de calor. A potência que ingressa

na coluna do arco aumenta com o incremento da corrente de soldagem e do comprimento do arco. Esses resultados indicam que o comprimento do arco é crítico no controle da potência que ingressa ao sistema. Porém, outros trabalhos utilizaram a radiação do arco para o controle do comprimento do arco elétrico /81/.

9.10.2.- Processo MIG/MAG Pulsado

No processo de soldagem MIG/MAG pulsado, o valor da tensão instantânea do processo determinado entre o bico de contato e o metal base, é composto pelas soma das quedas de tensão, como mostra na Fig.54. As quedas parciais de tensão no processo, empregando eletrodo com polaridade positiva (CCEP) são dadas por:

- 1.- $u_{r(t)}$ = Queda de tensão devido à resistência elétrica do cabo de alimentação mais a queda devido à resistência de contato entre o bico de contato e o arame, mais a queda devido ao metal base e terra. Essa queda $u_{r(t)}$ é baixa porque a medição da tensão do processo é feita tão próximo (do bico de contato e metal base) quanto possível na prática;
- 2.- $u_{s(t)}$ = Queda de tensão devido à extensão de arame;
- 3.- $u_{arc(t)} = (u_{a(t)} + u_{L(t)} + u_{c(t)})$ = Queda de tensão devido ao ânodo, mais a queda devido ao arco elétrico (coluna ou plasma) é função de $L(t)$, mais a queda devido ao cátodo.

Onde a tensão do processo pode ser determinada, somando-se as quedas de tensão entre o bico de contato e o metal base, de acordo a seguinte expressão:

$$u_{(t)} = (u_{a(t)} + u_{L(t)} + u_{c(t)}) + u_{s(t)} + u_{r(t)} \quad (V) \quad [9.55]$$

Na Fig.54 mostra-se o esquema indicando os pontos de medição da tensão do processo (o mais próximo possível ao bico de contato e metal base) e da corrente de soldagem.

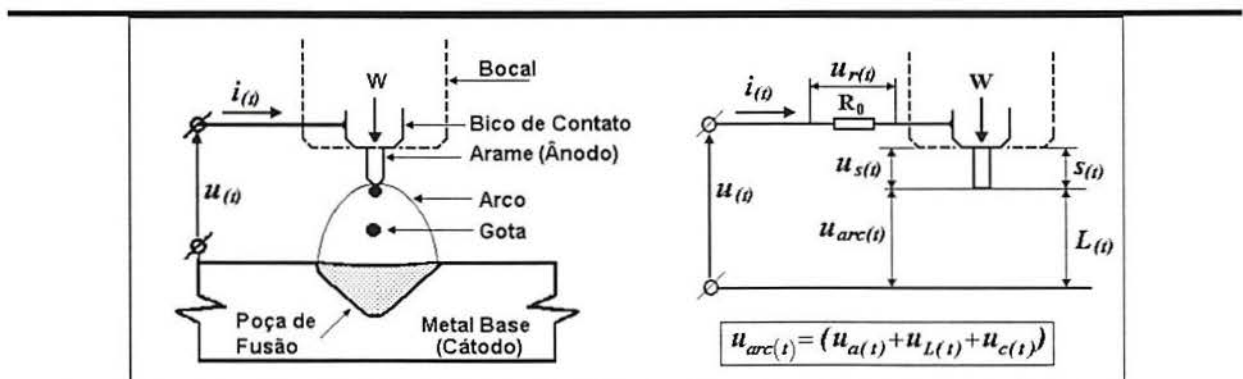


Fig.54: Esquema indicando-se os pontos de medição da tensão do processo e corrente de soldagem.

9.11.- Taxa Média de Fusão do Arame

A taxa de fusão do arame, utilizando o processo MIG/MAG convencional e eletrodo positivo, foi determinada empiricamente por Lesnewich /15/, para arame de aço ao carbono, sendo a seguinte expressão:

$$W = K_{01} \cdot j + K_{02} \cdot s \cdot j^2 \quad (\text{m / min}) \quad [9.56]$$

Onde:

K_{01} = Constante associada ao aquecimento do arco elétrico e depende da composição e diâmetro do arame;

K_{02} = Constante associada ao efeito Joule e depende da composição e diâmetro do arame;

j = Densidade da corrente de soldagem;

s = Extensão do arame.

Outros pesquisadores /26, 45/ chegaram à mesma expressão que a determinada por Lesnewich /15/, para o modo de transferência aerossol, utilizando arame de aço ao carbono.

No processo MIG/MAG convencional, a extensão do arame (s) se mantém aproximadamente constante durante a soldagem, para o modo de transferência aerossol.

Para o processo MIG/MAG pulsado, Allum /47/ realizou um estudo detalhado da taxa de fusão do arame integrando a equação [9.56] em função do tempo, no período T , determinando assim a taxa média de fusão do arame (igual à velocidade de alimentação do arame):

$$W = K_1 \cdot I_m + K_2 \cdot s \cdot I_{ef}^2 \quad (\text{m / min}) \quad [9.57]$$

Equações similares à [9.57] foram determinadas recentemente por vários pesquisadores /42, 46, 47/, sempre considerando a forma de onda “*retangular*” da corrente de soldagem e parâmetros I_p , I_b , T_2 (T_p) e T_4 (T_b), ou seja, com taxa de resposta da fonte infinito. Na prática, a taxa de resposta das fontes de soldagem têm valor finito (0,5 a 1,0 A/ μ s) /61/ quando é utilizado a forma de onda retangular na tensão de controle da fonte de soldagem. Outro fator importante a ser considerado na análise é a extensão do arame s (mm), que varia quando são utilizados pulsos periódicos, sendo mais significativa tanto maior é a duração da corrente de base (T_b), porque durante esse tempo não há fusão do arame, devido ao valor da energia ser insuficiente. Essa variação na extensão do arame torna difícil aplicar com total sucesso a equação [9.57] na determinação da velocidade de alimentação do arame. O valor de K_2 , da equação [9.57], é fortemente influenciado pelo modo de transferência de massa, variando

ligeiramente com a transição do modo globular para aerossol. Portanto K_2 é uma variável estritamente dependente do modo de transferência /59/.

Os valores das constantes K_1 e K_2 são obtidos utilizando o processo MIG/MAG convencional, para o modo de transferência aerossol (projetado) e uma determinada extensão de arame, e com o mesmo tipo, diâmetro, composição e gás de proteção que será usado no processo pulsado. Uma vez obtidos os valores de K_1 e K_2 são substituídos na equação [9.57].

Amin /40/, no estudo básico realizado para o processo MIG pulsado “sinérgico”, não considerou o termo referente ao efeito Joule, utilizando a seguinte equação:

$$W = m_{fa} \cdot I_m \quad (\text{m / min}) \quad [9.58]$$

A validade da equação [9.58] é questionada quando são utilizados baixos valores de corrente média de soldagem ($I_m < 100$ A). Essa discrepância pode ser explicada porque na equação [9.58] supõe-se que o valor da tensão do processo é constante, o qual, na prática, varia conforme a corrente instantânea de soldagem, o que pode ser observado nas Figs.66a-66g (Cap.12). No processo MIG/MAG pulsado com controle sinérgico, a equação [9.58] pode ser aplicada na determinação de forma aproximada da velocidade de alimentação do arame, onde o operador deve realizar um ajuste fino necessário para obter as ótimas condições de soldagem.

Na maioria dos estudos realizados até o presente, a taxa de fusão do arame é dada em função das correntes média (I_m) e eficaz (I_e), e da extensão do arame (s), sendo a última definida como a distância desde o ponto onde a corrente de soldagem ingressa ao arame até a ponta do mesmo, onde começa o arco.

A extensão do arame (s) não é fácil de ser medida, pois não pode ser determinado com precisão o ponto onde a corrente de soldagem ingressa ao arame, que por sua vez depende das condições do bico de contato. A determinação da ponta do arame (onde começa o arco) não é um problema trivial, devido à presença do arco elétrico. Outro fator importante a se considerar, é que seu valor não é constante, utilizando-se pulsos periódicos de corrente, para uma condição dada de soldagem, variando com os parâmetros do pulso.

Os trabalhos anteriores sobre a determinação da taxa média de fusão do arame em função das correntes média (I_m) e eficaz (I_e), e da extensão do arame (s) são muito importantes. Mas, nesse estudo o objetivo é obter uma expressão simplificada da taxa de fusão do arame, para uma condição estável, em função de parâmetros medidos com maior facilidade.

No processo de soldagem MIG/MAG pulsado, o valor médio da taxa de fusão do arame pode ser determinado em função da tensão do processo e corrente de soldagem fornecida pela fonte de soldagem ao sistema.

Supondo que o valor instantâneo da taxa de fusão do arame ($W_{fat(t)}$) é determinado pela energia fornecida pela fonte de soldagem (dE_a) e, transferida ao sistema (bico de contato, extensão do arame, arco elétrico, e outros tipos de resistência elétrica presente no circuito de medição), é composto pelos seguintes elementos:

$$dE_a = \left[(u_{a(t)} + u_{L(t)} + u_{c(t)}) \cdot i_{(t)} + u_{s(t)} \cdot i_{(t)} + u_{r(t)} \cdot i_{(t)} \right] \cdot dt \quad (J) \quad [9.59]$$

$$dE_a = p_{(t)} \cdot dt = [p_{arc(t)} + p_{s(t)} + p_{r(t)}] \cdot dt = [u_{(t)} \cdot i_{(t)}] \cdot dt \quad (J) \quad [9.60]$$

Análise: a potência $p_{(t)}$, fornecida pela fonte ao sistema é composta pela soma das potências parciais, dado por:

$$\therefore p_{r(t)} = u_{r(t)} \cdot i_{(t)} = R_0 \cdot i_{(t)}^2 \quad (W) \quad [9.60a]$$

$$\therefore p_{s(t)} = u_{s(t)} \cdot i_{(t)} = \bar{\rho} \cdot \frac{s_{(t)}}{A} \cdot i_{(t)}^2 \quad (W) \quad [9.60b]$$

$$\therefore p_{arc(t)} = (u_{a(t)} + u_{L(t)} + u_{c(t)}) \cdot i_{(t)} \quad (W) \quad [9.60c]$$

A potência $p_{r(t)}$ é a dissipada em R_0 e pode ser desprezada, devido ao valor de R_0 ser baixo. Portanto, os mais significativos dos três termos de potência são $p_{s(t)}$ e $p_{arc(t)}$.

É importante notar que a variável extensão do arame ($s_{(t)}$) introduzida nessa análise, é função do tempo, onde a variação da extensão do arame (Δs) pode ser determinada como o produto da velocidade de alimentação do arame (W) pelo tempo em que não há fusão do arame. Por exemplo, para W e se durante o período de tempo T_b não há fusão do arame, Δs é calculado como:

$$\Delta s = \frac{W \cdot T_b}{60} \quad (mm) \quad [9.60d]$$

No processo MIG/MAG pulsado, há variação da extensão de arame ($s_{(t)}$), e quando a distância bico de contato-metal base é constante durante a soldagem, o comprimento do arco elétrico ($L_{(t)}$) é função do tempo. Além disso, o arco elétrico tem um comportamento não ôhmico, portanto, a $p_{arc(t)}$ deve ser determinada como o produto dos valores instantâneos da tensão do arco pela corrente de soldagem.

Da fórmula de potência do sistema ($p_{(t)}$), duas situações merecem ser analisadas qualitativamente, conforme o que segue:

(1).- Quando na soldagem se utiliza arame com valor de resistividade elétrica baixo, como no caso do alumínio e suas ligas, o termo da potência devido ao efeito Joule pode ser desprezado em relação à $p_{arc(t)}$, isto é, $p_{s(t)} \cong 0$, então, tem-se que:

$$p_{(t)} \cong p_{arc(t)} = (u_{a(t)} + u_{L(t)} + u_{c(t)}) \cdot i_{(t)} \quad (W) \quad [9.60e]$$

(2).- Quando na soldagem se utiliza arame com valor de resistividade elétrica alto, como nos casos dos aços ao carbono e inoxidáveis, o termo da potência devido ao efeito Joule deve ser considerado:

$$p_{(t)} = (u_{a(t)} + u_{L(t)} + u_{c(t)}) \cdot i_{(t)} + \bar{\rho} \cdot \frac{S_{(t)}}{A} \cdot i_{(t)}^2 = p_{arc(t)} + p_{s(t)} \quad (W) \quad [9.60f]$$

A potência do arco elétrico é afetada pela variação da corrente de soldagem, variação do comprimento do arco e da distribuição de pressão do arco sobre a poça de fusão, que por sua vez influi no tamanho e forma da área de fusão da solda /82/.

Retomando à análise da taxa de fusão do arame, a energia mínima para fundir e destacar uma unidade de volume de arame é h_a , quantidade necessária para elevar a temperatura de ambiente até o ponto de fusão, fundi-lo (calor latente de fusão), e uma pequena parte do volume de arame tem a sua temperatura elevada ao ponto de ebulição e vaporização.

Da quantidade total de energia fornecida pela fonte ao sistema (dE_a), somente uma parcela ($dE_{fa} = \eta_{fa} \cdot dE_a$) da mesma é utilizada para fundir um determinado volume de arame, onde η_{fa} é definido como a eficiência de fusão do arame ($0 \leq \eta_{fa} \leq 1$).

Supondo que a seguinte condição instantânea é válida, então pode ser realizado o balanço de energia, e ser satisfeita a seguinte igualdade:

$$\left| \begin{array}{l} \text{Energia mínima necessária para fundir} \\ \text{um determinado volume de arame} \end{array} \right| = \left| \begin{array}{l} \text{Energia utilizada para fundir esse volume de arame} \\ \text{(parcela de energia fornecida pela fonte ao sistema)} \end{array} \right|$$

$$dE_{fa} = [K_a \cdot A \cdot h_a \cdot W_{fa(t)}] \cdot dt = \eta_{fa} \cdot [p_{arc(t)} + p_{s(t)}] \cdot dt = \eta_{fa} \cdot p_{(t)} \cdot dt \quad (J) \quad [9.61]$$

Quando há estabilidade do arco e transferência de massa, a velocidade de alimentação do arame (W) é igual à taxa média de fusão do arame (W_{fa}), onde $W_{fa(t)}$ é função do tempo e é periódica, para uma função periódica da potência do sistema, a igualdade é possível integrar no período T , tem-se:

$$(K_a \cdot A \cdot h_a) \cdot \frac{1}{(i) \cdot T} \cdot \int_{t_0+(i-1)T}^{t_0+(i)T} W_{fa(t)} \cdot dt = \eta_{fa} \cdot \left(\frac{1}{(i) \cdot T} \cdot \int_{t_0+(i-1)T}^{t_0+(i)T} p_{(t)} \cdot dt \right) \quad (W) \quad [9.62]$$

No presente trabalho, os valores de A (mm^2) e h_a (J/mm^3) são constantes, e considera-se que a eficiência de fusão do arame (η_a) não é função do tempo, no entanto, pode depender dos valores dos parâmetros de soldagem, diâmetro e composição do arame, tipo (maciço ou tubular) e composição do gás de proteção, da forma da onda da potência, entre outros. Em princípio, não existem estudos definindo a eficiência de fusão do arame.

A taxa média de fusão do arame (W_{fa}) é função da eficiência de fusão, da composição química e da seção transversal do arame, e da potência média do sistema, dada pela seguinte relação:

$$W_{fa} = \eta_{fa} \cdot \left(\frac{I}{K_a \cdot A \cdot h_a} \right) \cdot P_m \quad (\text{m} / \text{min}) \quad [9.63]$$

Quando há estabilidade do arco, é possível substituir a taxa média de fusão do arame (W_{fa}), da equação [9.63], pela velocidade de alimentação do arame (W), dado por:

$$W = W_{fa} = \frac{I}{K_a} \cdot \eta_{fa} \cdot \left(\frac{1}{A \cdot h_a} \right) \cdot P_m \quad (\text{m} / \text{min}) \quad [9.64]$$

$$W = K_{fa} \cdot \eta_{fa} \cdot P_m \quad (\text{m} / \text{min}) \quad [9.65]$$

Onde:

η_{fa} = Eficiência de fusão do arame, ($0 \leq \eta_{fa} \leq 1$);

A = Área transversal do arame, (mm^2);

h_a = Energia mínima necessária para fundir um volume de arame, (J/mm^3);

K_a = Constante de conversão de unidades, ($= 1000/60$), ($\text{mm} \cdot \text{min}/(\text{m} \cdot \text{s})$);

d = Diâmetro do arame, (mm);

P_m = Potência média do sistema, (W);

$W_{fa(t)}$ = Valor instantâneo da taxa de fusão do arame, (m/min);

W_{fa} = Taxa média de fusão do arame, (m/min);

W = Velocidade de alimentação do arame, (m/min);

$K_{fa} = I/(K_a \cdot A \cdot h_a)$ = Coeficiente de fusão do arame, ($\text{m}/(\text{min} \cdot \text{W})$).

A taxa média de fusão do arame (ou velocidade de alimentação do arame) da equação [9.65] pode ser obtida conhecendo-se a função da potência instantânea do sistema ($p_{(t)}$) e assim calcular o valor da potência média (P_m). Também é necessário conhecer o valor da eficiência de fusão do arame (η_{fa}). O coeficiente de fusão do arame (K_{fa}) é função do diâmetro, da composição, do tipo e das propriedades físicas do arame (h_a). Nesse trabalho, K_{fa} foi mantido constante, porque utilizou-se somente uma composição, tipo, e diâmetro de arame (composição de gás de proteção).

9.12.- Área Transversal do Metal de Adição

A partir da taxa média de fusão do arame, para uma transferência estável, pode ser determinado o volume médio de arame fundido por unidade de tempo (V_a), mediante a seguinte relação:

$$V_a = \frac{1}{(i) \cdot T} \cdot \int_{t_0+(i-1)T}^{t_0+(i)T} v_a(t) \cdot dt = K_a \cdot A \cdot \frac{1}{(i) \cdot T} \cdot \int_{t_0+(i-1)T}^{t_0+(i)T} W_{fa(t)} \cdot dt = K_a \cdot A \cdot W_{fa} \quad (\text{mm}^3 / \text{s}) \quad [9.66]$$

Quando há estabilidade, na equação [9.66] a taxa média de fusão do arame (W_{fa}) pode ser substituída pela velocidade de alimentação do arame (W), dada por:

$$V_a = K_a \cdot A \cdot W \quad (\text{mm}^3 / \text{s}) \quad [9.67]$$

Utilizando-se a equação [9.67] é possível calcular o volume de arame fundido por unidade de tempo. A Fig.55 mostra um esquema da função do volume fundido de arame ($v_a(t)$) em função do tempo, onde deseja-se salientar a sua periodicidade, já que é condição para se obter estabilidade.

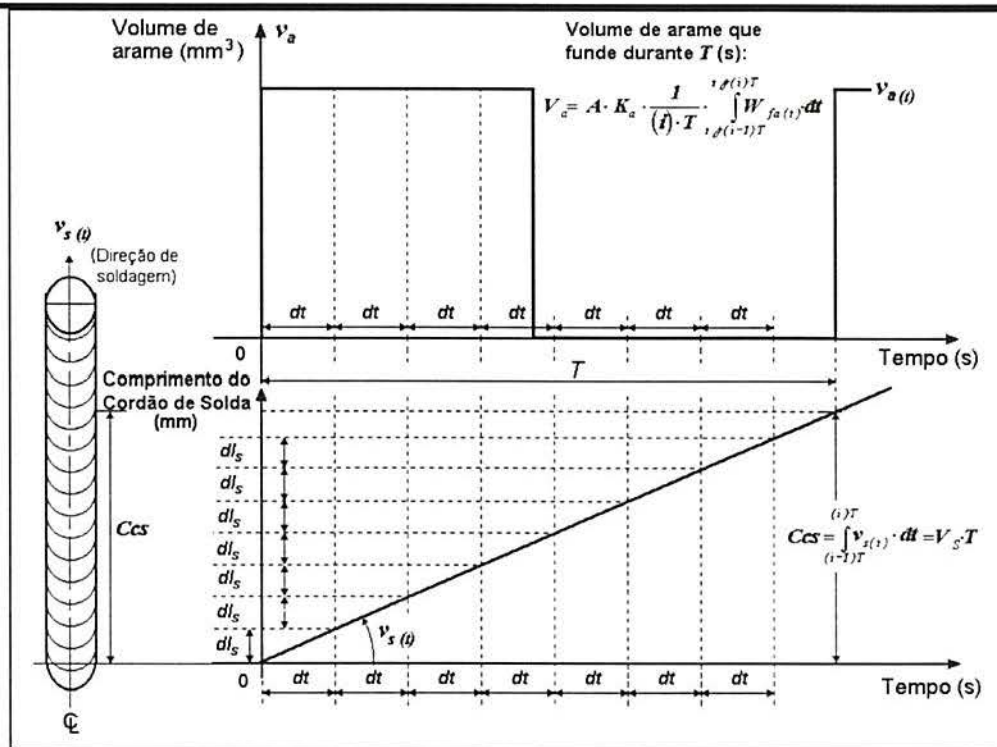


Fig.55: Esquema do volume instantâneo fundido de arame ($v_a(t)$) e o comprimento do cordão de solda em função do tempo.

Supondo que o valor instantâneo da área transversal do metal de adição ($AR_{(t)}$) no cordão de solda é dada pela seguinte relação:

$$AR_{(t)} = \eta_d \cdot \frac{v_a(t)}{v_s(t)} \quad (\text{mm}^2) \quad [9.68]$$

Quando a velocidade de soldagem é mantida constante durante a realização do cordão de solda, o valor médio da área transversal do metal de adição ou simplesmente área transversal do metal de adição, tem a seguinte expressão:

$$AR = \eta_d \cdot \frac{V_a}{V_s} = \eta_d \cdot \frac{K_a \cdot A \cdot W}{V_s} \quad (\text{mm}^2) \quad [9.69]$$

Onde:

AR = Área transversal do metal de adição, (mm^2);

η_d = Eficiência de deposição, ($0 \leq \eta_d \leq 1$);

$A = \frac{\pi}{4} \cdot d^2$ = Área transversal do arame, (mm^2);

V_s = Velocidade de soldagem, (mm/s).

A eficiência de deposição (η_d) depende do nível de salpico durante a soldagem, da quantidade de metal que se perde por evaporação, que por sua vez depende das propriedades do metal. Com a equação [9.69] é possível determinar a área transversal do metal de adição (AR), conhecendo-se os valores de W , d , η_d e V_s .

9.13.- Análise da Massa e Energia no Cordão de Solda

No processo MIG/MAG pulsado é possível realizar variações de energia e massa no cordão de solda mediante controles independentes da velocidade de alimentação do arame e da velocidade de soldagem. Essas variáveis podem ser ajustadas em função da necessidade de energia e/ou massa desejada.

A massa fundida do arame por unidade de tempo ($M_{fa(t)}$) pode ser determinada a partir do volume médio de arame fundido por unidade de tempo (V_a) e da densidade de massa do arame (δ_a), para uma condição estável, dada por:

$$M_{fa(t)} = V_a \cdot \delta_a = \eta_{fa} \cdot \left(\frac{\delta_a}{h_a} \right) \cdot P_m \quad (\text{g / s}) \quad [9.70]$$

Onde:

$M_{fa(t)}$ = Massa fundida do arame por unidade de tempo, (g/s);

V_a = Volume médio de arame fundido por unidade de tempo, (mm^3/s);

δ_a = Densidade de massa do arame, (g/mm^3).

A eficiência de fusão do arame (η_{fa}) foi determinada utilizando-se várias formas de onda, em um amplo espectro de valores de frequência e corrente de pico, e somente para uma combinação de *diâmetro-tipo-composição de arame-composição do gás de proteção*, e sob condição estável e periodicidade da tensão do processo e corrente de soldagem.

A energia média de soldagem (δE_a), uma vez ajustada a massa fundida (P_m), é possível alterar mediante a variação da velocidade de soldagem (V_s), conforme mostra a equação [9.71] a seguir:

$$\delta E_a = \frac{P_m}{V_s} \quad (\text{J} / \text{mm}) \quad [9.71]$$

A equação [9.70] mostra que, no processo MIG/MAG pulsado, a massa fundida do arame por unidade de tempo é função da potência média do sistema, para um mesma composição, diâmetro e tipo de arame, e independe da forma de onda de soldagem. A equação [9.71] mostra que a energia pode ser controlada mediante ajustes independentes da velocidade de alimentação do arame e da velocidade de soldagem. Desde o ponto de vista prático, é desejável utilizar baixos valores de energia média de soldagem e obter alta produtividade.

9.14.- Análises da Energia Média de Soldagem sobre as Eficiências de Fusão

A energia média de soldagem influi na solidificação da poça de fusão, afetando a microestrutura do metal de solda e as propriedades mecânicas. No entanto, limitando o valor da energia média de soldagem em um determinado intervalo, é possível obter um controle metalúrgico aproximado sobre a microestrutura da união, porque na equação da energia não se considerada a distribuição de energia no arco elétrico.

A energia média de soldagem depende das variáveis principais do processo, que são:

- Corrente de soldagem;
- Tensão do processo;
- Velocidade de soldagem.

Utilizando um determinado processo de soldagem e ajustes particulares nos valores dos parâmetros afetam a resposta metalúrgico/mecânica da junta soldada. Trocando o processo de soldagem, a resposta metalúrgico/mecânica pode ser afetada significativamente, apesar de usar aproximadamente igual valor da energia média de soldagem. Schultz, Jackson, e outros /83, 84/, demonstraram, que conhecendo a energia de soldagem, de uma maneira geral, pode-se prever a resposta metalúrgica. Os autores /83/ determinaram a relação entre a tensão de escoamento e o tamanho da solda.

9.14.1.- Eficiência de Fusão do Consumível

O objetivo é determinar a eficiência de fusão do consumível (η_{AR}), depois comparar à eficiência de fusão do arame (η_{fa}). Tendo presente as seguintes equações:

$$AR = \eta_a \cdot K_a \cdot A \cdot \frac{W}{V_s} \quad (\text{mm}^2) \quad [9.72]$$

$$\eta_{fa} = K_a \cdot A \cdot h_a \cdot \frac{W}{P_m} \cdot 100 \quad (\%) \quad [9.73]$$

Substituindo a equação [9.72] na equação [9.73], se tem a eficiência de fusão do arame em função da área transversal do metal de adição, velocidade de soldagem, potência média do sistema, propriedades físicas do arame e da eficiência de deposição, dada por:

$$\eta_{fa} = \frac{AR}{\eta_d} \cdot h_a \cdot \frac{V_s}{P_m} \cdot 100 \quad (\%) \quad [9.74]$$

A eficiência de fusão do consumível pode ser calculada mediante a seguinte relação:

$$\eta_{AR} = \eta_d \cdot \eta_{fa} = h_a \cdot AR \cdot \frac{V_s}{P_m} \cdot 100 = \frac{h_a \cdot AR}{\delta E_a} \cdot 100 \quad (\%) \quad [9.75]$$

Onde a eficiência de fusão do consumível (η_{AR}) é função da área transversal do metal de adição (AR), propriedades físicas do arame (h_a) e da energia média de soldagem (δE_a).

9.14.1.1- Eficiência de Fusão do Arame vs. Consumível

.- Quando a eficiência de deposição (η_d) é menor que 1, significa que do total de arame fundido somente uma parte é depositada para formar a área transversal do metal de adição, então:

$$\eta_{fa} > \eta_{AR} \quad (\%) \quad [9.76]$$

.- Quando a eficiência de deposição é $\eta_d \cong 1$, significa que apresenta um baixíssimo nível de salpico e evaporação de arame fundido. Na prática pode obter-se valores de η_d próximo a 1, para uma condição estável no arco elétrico e na transferência de massa. Então a eficiência de fusão do arame é aproximadamente igual à do consumível, dado por:

$$\eta_{fa} \cong \eta_{AR} \quad (\%) \quad [9.77]$$

Nesse caso, é possível calcular a eficiência de fusão do arame determinando a área transversal do metal de adição, a energia média de soldagem e h_a do arame.

9.14.2.- Eficiência de Fusão do Metal Base

A eficiência de fusão do metal base (η_{AB}) pode ser obtida a partir da eficiência de fusão do consumível (η_{AR}), substituindo a área transversal do metal de adição (AR , mm²) pela área transversal fundida do metal base (AB , mm²), e assim se tem que:

$$\eta_{AB} = \frac{h_{mb} \cdot V_s \cdot (AB)}{P_m} \cdot 100 \quad (\%) \quad [9.78]$$

Se $h_{mb} \cong h$, a equação [9.78] pode ser escrita como segue:

$$\eta_{AB} = \frac{h \cdot (AB)}{\delta E_a} \cdot 100 \quad (\%) \quad [9.79]$$

Onde a eficiência de fusão do metal base (η_{AB}) é função da área transversal fundida do metal base (AB), propriedades físicas do M.B. (h_{mb}) e da energia média de soldagem (δE_a).

9.14.3.- Eficiência de Fusão do Processo

Niles e Jackson /55/, utilizando o processo TIG autógeno, definiram a eficiência de fusão do processo ($0 \leq \eta_p(\%) \leq 100$) como a porcentagem da energia que ingressa à tocha da fonte de soldagem utilizada, para formar a zona de fusão (AB , mm²). Chandel /85/, estendeu esse conceito e o aplicou na determinação das eficiências de fusão do metal base e do consumível (determinando as áreas AB e AR , respectivamente), para os processos MIG/MAG convencional, eletrodo revestido e arco submerso. A Fig.56 mostra um esquema da seção transversal do cordão de solda.

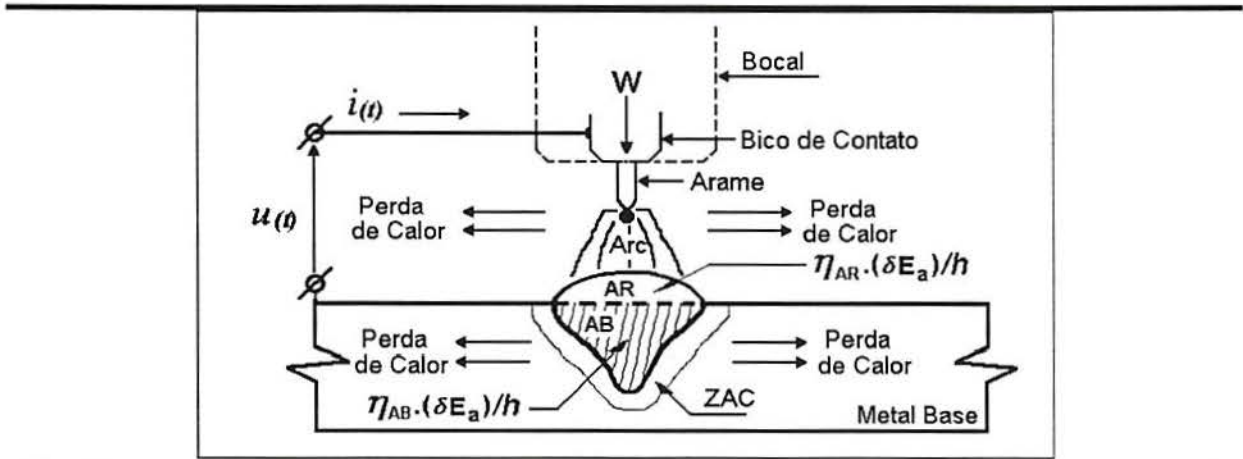


Fig.56: Esquema seção transversal do cordão de solda, das eficiências de fusão do processo, do metal base e do consumível.

Quintino e Allum /54/, utilizaram o processo MIG/MAG pulsado e o mesmo conceito que o aplicado por Niles e Jackson /55/, e como já foi mostrado no Cap. 6, equação [6.1], a eficiência de fusão do processo é dada por:

$$\eta_p = \frac{h \cdot V_s \cdot (AB + AR)}{I_m \cdot U_m} \cdot 100 \quad (\%) \quad [9.80]$$

A equação [9.80] para ser aplicada ao processo MIG/MAG pulsado precisa ser modificada e adaptada aos parâmetros do próprio processo, como se demonstra a continuação.

A eficiência de fusão do processo (η_p) pode ser calculada a partir da soma das eficiências de fusão do metal base (η_{AB}) e do consumível (η_{AR}), como segue:

$$\eta_p = \eta_{AB} + \eta_{AR} = \left(\frac{h_{mb} \cdot V_s \cdot (AB)}{P_m} + \frac{h_a \cdot V_s \cdot (AR)}{P_m} \right) \cdot 100 \quad (\%) \quad [9.81]$$

Alguns autores /54, 85/ consideram, que se o arame e metal base usados são de aço baixo carbono o valor da energia necessária para fundir e destacar um volume de arame (h_a) é aproximadamente igual à do metal base (h_{mb}), então, $h_a \cong h_{mb} \cong h$, a equação [9.81] pode ser escrita como segue:

$$\eta_p = \frac{I}{\delta E_a} \cdot h \cdot (AB + AR) \cdot 100 \quad (\%) \quad [9.82]$$

Onde:

η_p = Eficiência de fusão do processo, (%);

η_{AB} = Eficiência de fusão do metal base, (%);

η_{AR} = Eficiência de fusão do consumível, (%);

AB = Área transversal fundida do metal base, (mm²);

AR = Área transversal do metal de adição, (mm²);

δE_a = Energia média de soldagem, (J/mm).

Utilizando a equação [9.82] é possível calcular a eficiência de fusão do processo MIG/MAG pulsado, o que, em geral, coincide com o conceito utilizado por Chandel /85/, para os processos acima citados.

A equação [9.82] demonstra que a eficiência de fusão do processo é função essencialmente de três variáveis: potência média do sistema (P_m), velocidade de soldagem (V_s), e propriedades físicas do metal base (quando é equivalente ao do arame, $h_a \cong h_{mb} \cong h$) (h). Demonstrando que não há influência da forma de onda, desde que seja fornecida ao sistema o mesmo valor de energia média de soldagem, para determinar a eficiência de fusão do processo.

Niles e Jackson /55/ no seu trabalho determinaram que 1.495,3 J de energia são necessário para elevar a temperatura de 1 g de aço até a o estado líquido, cujo ponto de fusão T_f é de 1.750 °C (essa é a temperatura, suposta, de fusão do aço durante a soldagem). Supondo que a densidade do aço é de 0,00783 g/mm³, para de 1 g de aço se obtém um volume de 127,71 mm³.

Considerando que 1.495,3 J são necessário para fundir 127,71 mm³ de aço, portanto para fundir 1 mm³ de aço é preciso fornecer 1.495,3/127,71 J = 11,709601 J de energia, então o valor de $h = 11,709601$ J/mm³.

O valor de 1.495,3 J obtido por Niles e Jackson /55/ não difere significativamente de valores obtidos por outros autores, Waszink *et al.* /26/, Jelmorini *et al.* /86/ e Esser *et al.* /87/.

10.- MÉTODOS, EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS

10.1.- Fonte de Soldagem

Uma fonte DIGIPULSE 450[®] (L-TEC) tipo inversora foi utilizada na realização dos cordões de solda, sendo a mesma capaz de fornecer 350 A com um ciclo de trabalho de 100%, ou 500 A com um ciclo de 50 %. O ciclo de trabalho da fonte de soldagem é mostrado na Fig.57. A fonte pode ser alimentada com 230 ou 460 V trifásico (C.A.), e sua característica Tensão e Corrente de saída é ajustável mediante o valor de tensão de controle, sendo esquematizada na Fig.58.

Os 460 V trifásico (C.A.) são retificados através de uma ponte à seis diodos, obtendo-se uma tensão retificada de aproximadamente 600 V alimentando o circuito de potência, que está dividido em dois módulos: PB1 e PB2. Os módulos PB1-2 recebem sinais de controle da placa inversora de controle (ICB), cujo sinal é do tipo de largura de pulso modulada (Pulse Width Modulated - PWM). Devido à alta tensão existente nas placas de potência (PBs) o acoplamento com a controladora é feito através de transformadores de pulso que proporcionam um adequado isolamento elétrico.

O chaveamento de potência é feito através de 32 MOS-FETS (IRFP450) com aproximadamente 600 V de corrente contínua e o sinal resultante é inserido em um transformador (MTR). Os PB1 e PB2 estão acoplados a TAPs distintos, porém idênticos do primário de MTR. No secundário do MTR existe uma retificação onda completa/center tap e um filtro indutivo simples, o qual é utilizado para a opção MIG/MAG convencional ou curto-circuito da própria máquina.

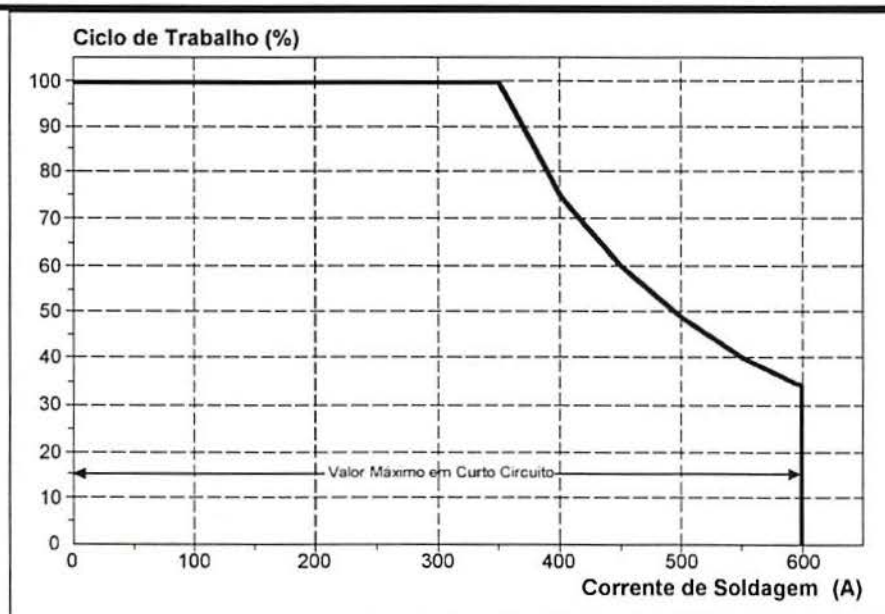


Fig.57: Ciclo de trabalho da fonte para soldagem.

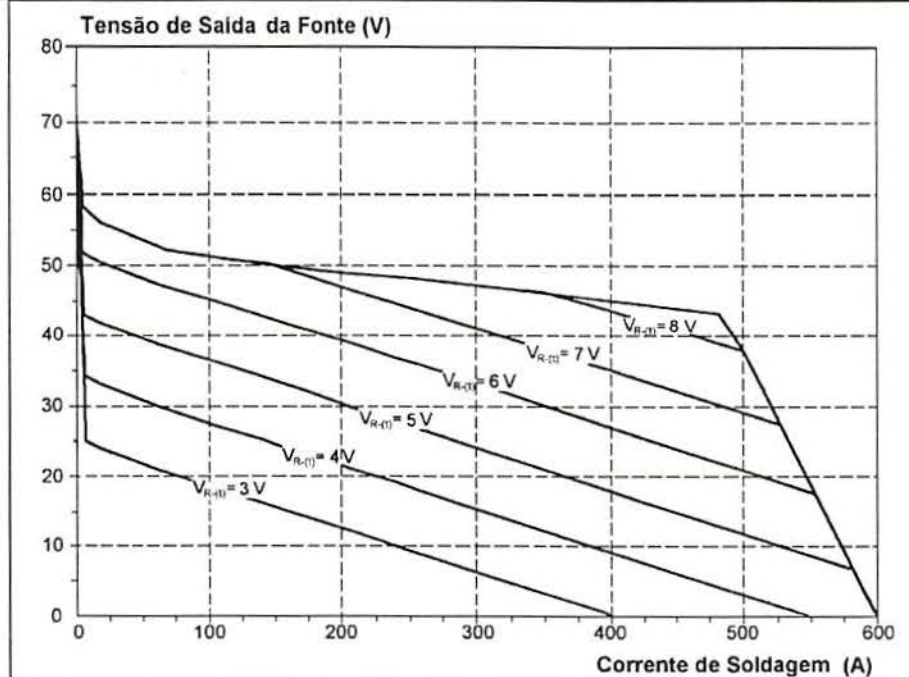


Fig.58: Característica tensão e corrente de saída da fonte para soldagem, para um valor dado de tensão de controle da fonte.

10.1.1.- Placa Inversora de Controle da Fonte

Os sinais de entrada da placa inversora de controle da fonte (ICB: Inverter Control Board) são sinais analógicos comuns, ou seja, não possuem qualquer tipo de modulação. Assim, torna-se relativamente fácil alterar a forma de onda na saída, bastando alterar os sinais de excitação observando a função de transferência (*saída/entrada*).

Realizando algumas verificações práticas, constatou-se que a resposta (corrente de soldagem) da fonte para soldagem é linear com tempos finitos, com exceção da região de saturação. Os valores necessários de excitação da fonte para soldagem, dentro dos limites lineares, são de 0 - 10 V correspondendo 0 - 600 A de corrente de soldagem.

Com o objetivo de alterar a forma da onda de saída da fonte de soldagem, os sinais de controle de interesse são a corrente de base I_b (P1-10) e a corrente de pico I_p (P2-8).

A placa inversora possui como sinais de entrada aqueles especificados na Tabela 3.

Tab.3: Descrição das conexões de entrada do sinal analógico na placa ICB.

Descrição	Localização na Placa ICB
Tocha	P2-10
Peça	P3-9
Pulso	P3-2
Corrente Std.	P1-10
Corrente de Base	P1-10
Corrente de Pico	P2-8

10.1.2.- Método de Controle da Fonte

Dominando os princípios de funcionamento da fonte para soldagem, basta elaborar um sistema capaz de gerar formas de onda de tensão quaisquer dentro do intervalo predeterminado. Cabe salientar que a impedância de saída do gerador não necessita ser baixa dada a relativa alta impedância na entrada da fonte DIGIPULSE 450[®] (L-TEC).

O mercado oferece geradores de ondas com formatos padrões e excelente desempenho, alta velocidade, facilidade de programação, vários canais, memória, porém, o custo é relativamente elevado.

Geradores analógicos não são adequados para a função desejada dada a sua baixa versatilidade, instabilidade em frequência e tensão. Portanto, a melhor solução é a utilização de um gerador de sinal digital. Existem alternativas em relação ao gerador digital, que são:

- Desenvolver um circuito microprocessado;
- Gravar as formas de onda em memórias EPROM;
- Utilizar um computador.

Para o *LS&TC* a última alternativa é a mais atrativa, pois tornam-se infinita as alternativas de formas de onda.

Assim, utilizando um microcomputador, um conversor digital para analógico (D/A), e o desenvolvimento de um software em linguagem C, pode-se obter praticamente infinitas formas de onda. As funções das formas de onda são geradas em sinal digital, que é convertido para analógico e enviado à placa inversora de controle (ICB) da fonte de soldagem, para obter a forma de onda de corrente de soldagem desejada.

10.2.- Dispositivo Universal de Soldagem

Para a condução linear da tocha foi empregado um dispositivo mecanizado projetado e construído no *LS&TC* que permite a variação contínua da velocidade de soldagem no intervalo de 1 a 11 mm/s. Durante a soldagem foi observado uma pequena diminuição da velocidade de soldagem preestabelecida, podendo ser ocasionada por variação da tensão na rede de alimentação ou devido ao efeito da corrente de soldagem.

10.3.- Osciloscópio Digital com Memória

Registraram-se os sinais em um osciloscópio digital com quatro canais de memória, marca Schlumberger, modelo SI 5602C, o que permitiu visualizar a forma de onda da corrente de soldagem e tensão do processo, assim como verificar os valores reais. Esses dados foram transmitidos a um computador através da interface RS232, para seu posterior processamento.

O osciloscópio apresenta uma sensibilidade vertical (Y) de $[Y \pm 3\%]$ e uma horizontal (X) de $[X \pm 1\%]$, para os valores medidos. A propagação da incerteza no cálculo da potência determinada como o produto dos valores instantâneos da corrente de soldagem pela tensão do processo apresenta uma sensibilidade vertical de (Py) de $[Py \pm 4,24\%]$ Watts e uma horizontal (Px) de $[Px \pm 1,4\%]$, para os valores medidos, /88/.

10.4.- Amplificador Opto-Acoplado

O amplificador isolador e acoplador óptico (LM300), definido como amplificador opto-acoplado foi projetado e construído no Laboratório de Instrumentação da UFRGS. Esse instrumento foi utilizado para proporcionar elevada isolamento galvânica entre o sinal de entrada (potência, alta tensão) e a saída (medição feita com instrumento sensível à tensão > 20 V). O sinal de entrada pode ser reduzido ou amplificado obtendo-se um sinal de saída igual, menor ou maior que o de entrada. O amplificador foi calibrado e aferido mediante a utilização de instrumentos de uso laboratorial.

10.5.- Transdutor de Corrente Elétrica

O transdutor de corrente elétrica é baseado no efeito Hall. É um sensor de corrente apropriado para realizar medições eletrônicas de correntes contínuas ou variável no tempo, apresenta elevada isolamento galvânica entre primário (alta corrente) e o secundário do circuito.

A corrente de soldagem é convertida em tensão pelo sensor Hall. Utilizou-se uma fonte retificada com saída controlada de ± 15 V e um sensor Hall marca LEM, tipo LT 500-S, com precisão de $\pm 0,3 \%$ no intervalo de 0-500 A. Esse sensor foi aferido no Laboratório de Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico (LEPACE) da UFRGS, o qual conta com instrumentos e fonte de corrente apropriados para tal finalidade.

Características técnicas do sensor utilizado:

- .- Offset de corrente para o primário com corrente zero: Máximo $\pm 0,2$ mA;
- .- Drift com temperatura de offset de corrente: Típico $\pm 0,2$ mA
- .- Temperatura entre 0 e 70 °C: Máximo $\pm 0,3$ mA;
- .- Taxa de acompanhamento do sinal (di/dt) superior a 50 A/ μ s;
- .- Intervalo de frequência de trabalho: 0 a 150 kHz (-1dB);
- .- Tempo de resposta inferior a 1 μ s;
- .- Linearidade $< 0,1 \%$.

10.6.- Placa de Aquisição de Dados

O Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas (*LS&TC*) dispõe de uma placa de aquisição de dados com 16 canais analógicos, 2 digitais, 90 kHz, 12 bits de resolução vertical para 20 V. Neste trabalho foi somente utilizada para comparar com os sinais adquiridos utilizando o osciloscópio, os quais não apresentaram diferença significativa. Portanto, optou-se por usar o osciloscópio para a leitura da tensão do processo e corrente de soldagem, o qual apresenta vantagens adicionais em relação à placa:

- É possível observar em tempo real os oscilogramas e ajustar, por exemplo, a velocidade de alimentação do arame para se obter estabilidade;
- Durante a soldagem é possível armazenar os dados em quatro instantes diferentes.

Um desenho esquemático dos equipamentos utilizados na realização dos cordões de solda “bead-on-plate” e filete, é mostrado na Fig.59.

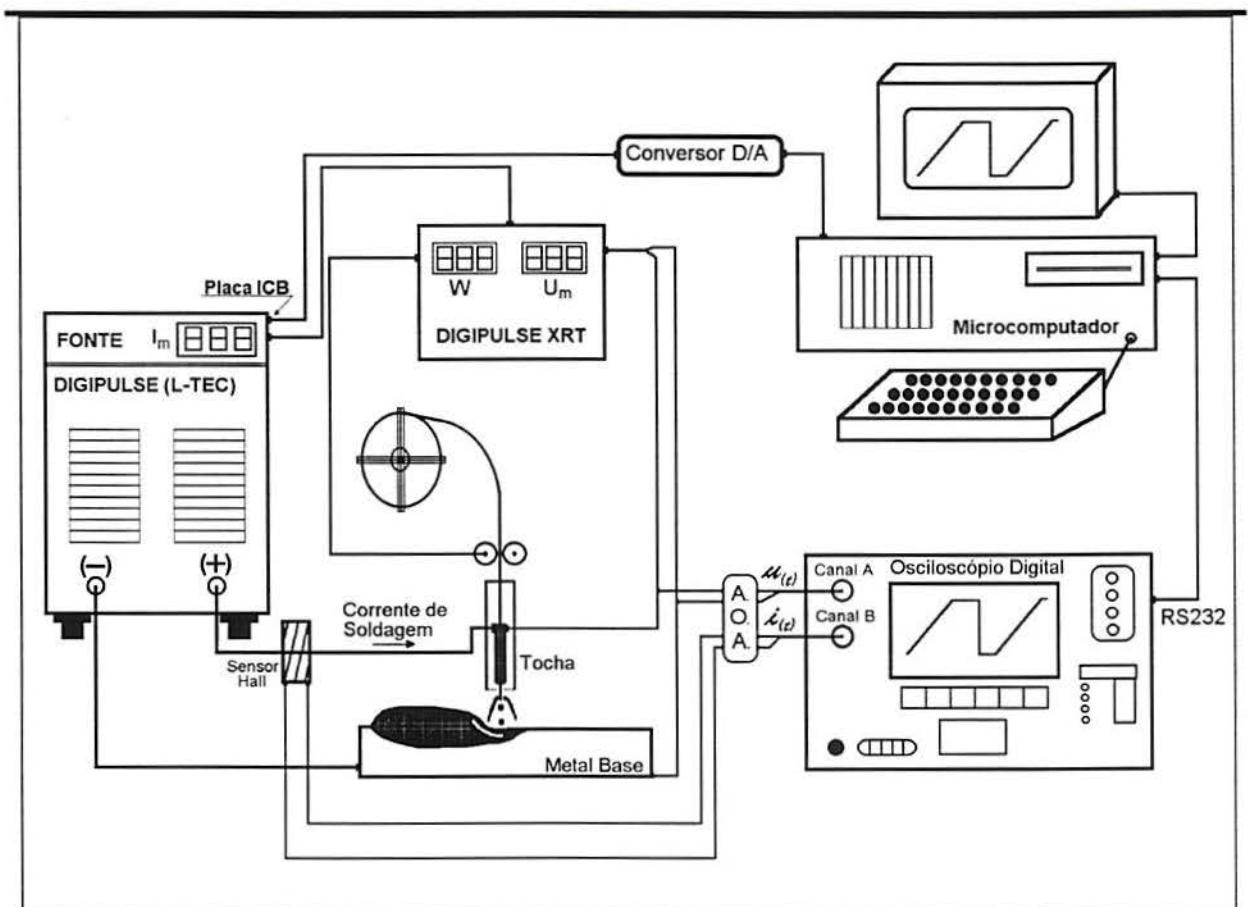


Fig.59: Desenho esquemático dos equipamentos utilizados na realização dos cordões de solda “bead-on-plate” e filete. (A.O.A.: Amplificador Opto-Acoplado)

11.- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

11.1.- Cordões de Solda Depositados sobre Chapa (“Bead-on-Plate”)

Foram realizados vários cordões de solda “bead-on-plate” (1G) preliminares, para poder estabelecer os parâmetros a serem fixados e definir seus valores.

Portanto, estudou-se os efeitos da frequência e das formas de onda periódicas de tensão de controle da fonte DIGIPULSE 450® (L-TEC), conforme mostra a Fig.60, sobre as características de fusão dos cordões de solda “bead-on-plate”. Esses cordões foram realizados aplicando um projeto fatorial totalmente cruzado.

Na Fig.60 são mostradas as formas de onda de tensão obtidas na saída do conversor D/A, e que foram utilizadas no controle da fonte para soldagem, para a realização dos cordões de solda “bead-on-plate”, posição plana.

Com o objetivo de analisar o efeito da forma e frequência da onda da tensão de controle da fonte de soldagem sobre as características de fusão, alguns parâmetros foram mantidos constantes durante a realização dos cordões de solda, desta fase da experiência, e são mostrados na Tabela 4.

Tab.4: Parâmetros operacionais mantidos constantes durante a realização dos cordões de solda “bead-on-plate”, posição plana.

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
Distância bico de contato-metal base	20 mm
Eletrodo: diâmetro, material	1,2 mm; (AWS A5.18-79) ER70 S-6
Vazão e tipo de gás	20 l/min; Ar+4%CO ₂
Metal base	Aço baixo carbono (SAE 1020)
Dimensão do Metal Base (M.B.)	260x80x12,7 mm
Temperatura dos M.B.	Ambiente
Tensão de Controle da V_{R-b}, na saída do D/A	0,6 V (\cong 60 A)
Tensão de Controle da V_{R-p}, na saída do D/A	6,5 V
Velocidade de soldagem (V_s)	4 mm/s
Polaridade	Eletrodo Positivo (CCEP)
Ângulo da tocha	10° (Empurrando)
Condução da tocha	Dispositivo Mecanizado

A seguir são apresentados os parâmetros controláveis utilizados na realização dos diversos cordões de solda:

- ♦ **Fator A:** Forma da onda de tensão de controle da fonte (Ai),

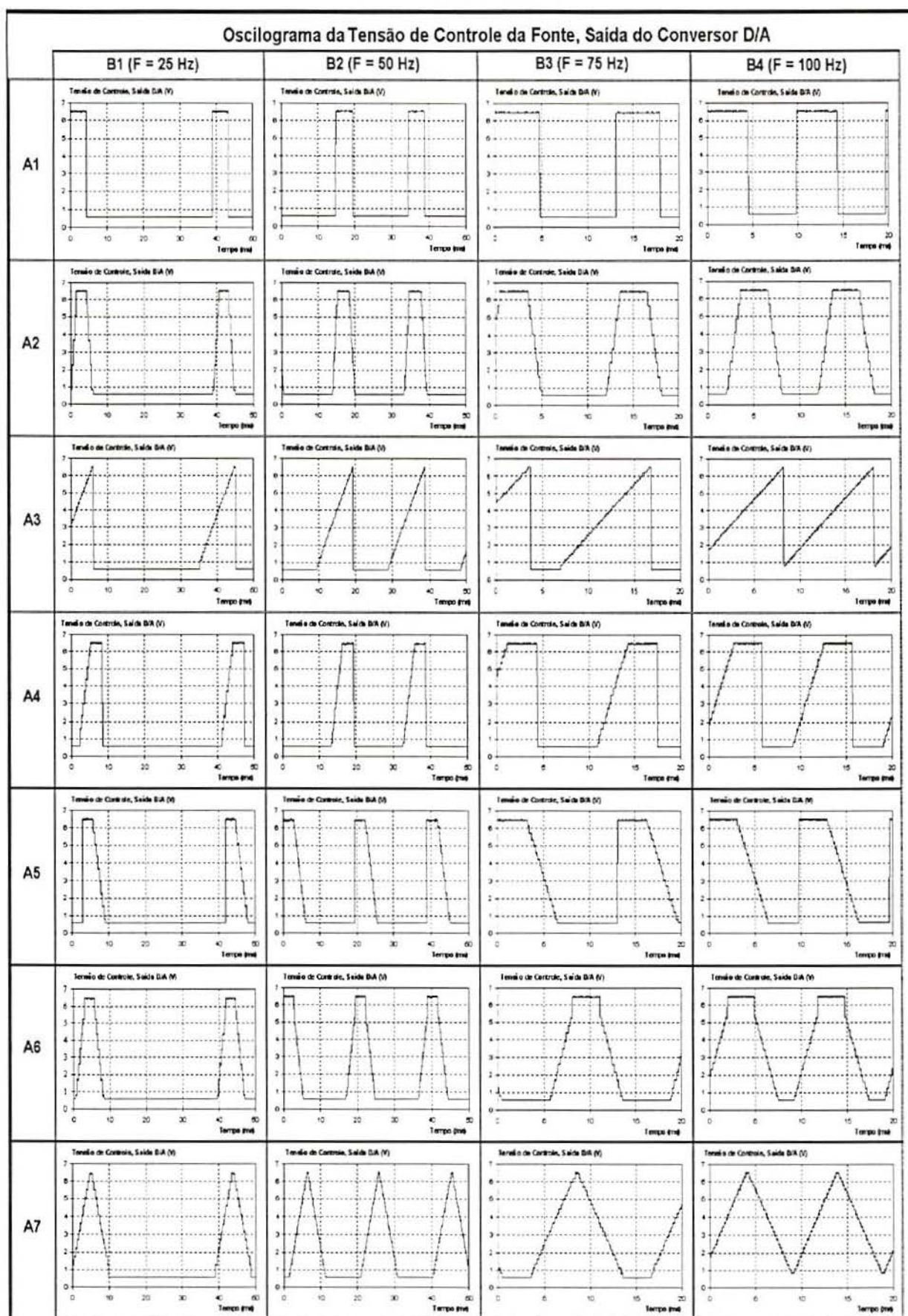


Fig.60: Formas da onda de tensão de controle da fonte de soldagem, obtidas na saída do conversor D/A, utilizadas na realização do cordão de solda “bead-on-plate”, posição plana.

fator qualitativo com sete níveis fixos de formas: A1, A2, A3, A4, A5, A6 e A7;

♦ **Fator B:** Frequência da onda de tensão (**Bj**),

fator quantitativo com quatro níveis fixos de **F**: 25, 50, 75 e 100 Hz.

A área abaixo do pulso (composto pelos tempos T_{R-1} , T_{R-2} e T_{R-3}) da tensão de controle da fonte para soldagem foi constante, independente da forma de onda, como também para os valores de frequência utilizados (25, 50, 75 e 100 Hz). A variação de nível da frequência foi realizada mediante a alteração do valor de duração do tempo T_{R-4} . Portanto, o parâmetro de controle da frequência na realização dos cordões de solda “bead-on-plate” foi o tempo T_{R-4} . Na Tabela 5, são mostrados as formas e os valores dos parâmetros de tempo da onda de controle da fonte de soldagem para cada combinação de tratamento.

O valor médio da tensão de controle da fonte para cada nível de frequência é aproximadamente igual, como também os valores da tensão de controle de pico (V_{R-p}) e base (V_{R-b}).

Uma vez determinados os valores dos parâmetros (Tabela 5) foram repetidos no mínimo três vezes a solda para cada combinação de tratamento para monitorar a resposta, depois chegou-se às três seguintes situações de condições de soldagem:

1.- Manter aproximadamente constante o valor da tensão média do processo (≈ 24 V), para as diferentes formas e frequências da onda de tensão de controle da fonte (mostrada na Fig.60), mediante o ajuste da velocidade de alimentação do arame.

Quando os cordões de solda foram realizados com baixos valores de frequência (25 e 50 Hz) e qualquer das formas de ondas utilizadas neste experimento, tornou-se difícil estabilizar o arco, e por isso, a transferência de massa não foi estável, produzindo excessivo salpico. No entanto, para valores de frequência de 75 e 100 Hz, obteve-se uma boa estabilidade do arco elétrico e transferência de massa, com baixíssimo nível de salpico. Porém, com as formas de onda dente de serra (A3) e triangular (A7) não foi possível obter estabilidade, sendo o modo de transferência globular, observado a olho nu, para qualquer valor de frequência utilizado (25, 50, 75 ou 100 Hz).

2.- A segunda situação considerada é a seguinte: manter constante num estreito intervalo o valor da tensão média do processo, para cada valor de frequência, visando obter o arco elétrico e transferência estável, com baixíssimo nível de salpico. Com essa condição, para um mesmo valor de frequência e diferentes formas de onda, observou-se a necessidade de alterar a velocidade de alimentação do arame visando obter a periodicidade dos valores instantâneos da corrente de soldagem e tensão do processo em função do tempo, bem como a

Tab.5: Valores dos parâmetros da onda de tensão de controle para cada combinação de tratamento, cordão de solda “bead-on-plate”, posição plana.

Forma de Onda da Tensão de Controle da Fonte		Frequência da Tensão de Controle da Fonte (F)			
		25 Hz (B1)	50 Hz (B2)	75 Hz (B3)	100 Hz (B4)
<p>Corrente de Soldagem (A) ($V_{R(0)}; P_{(0)}$)</p>	(A1)	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 4,7 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 35,3 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 4,7 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 15,3 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 4,7 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 8,6 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 4,7 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 5,3 \text{ ms}$
<p>Corrente de Soldagem (A) ($V_{R(0)}; P_{(0)}$)</p>	(A2)	$T_{R-1} = 1,75 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 3,0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 1,75 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 33,5 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 1,75 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 3,0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 1,75 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 13,5 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 1,75 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 3,0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 1,75 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 6,8 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 1,75 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 3,0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 1,75 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 3,5 \text{ ms}$
<p>Corrente de Soldagem (A) ($V_{R(0)}; P_{(0)}$)</p>	(A3)	$T_{R-1} = 10 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 30 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 10 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 10 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 10 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 3,3 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 10 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 0 \text{ ms}$
<p>Corrente de Soldagem (A) ($V_{R(0)}; P_{(0)}$)</p>	(A4)	$T_{R-1} = 3,5 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 3,0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 33,5 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 3,5 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 3,0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 13,5 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 3,5 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 3,0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 6,8 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 3,5 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 3,0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 3,5 \text{ ms}$
<p>Corrente de Soldagem (A) ($V_{R(0)}; P_{(0)}$)</p>	(A5)	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 3,0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 3,5 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 33,5 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 3,0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 3,5 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 13,5 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 3,0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 3,5 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 6,8 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 3,0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 3,5 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 3,5 \text{ ms}$
<p>Corrente de Soldagem (A) ($V_{R(0)}; P_{(0)}$)</p>	(A6)	$T_{R-1} = 2,5 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 3,0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 2,5 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 32 \text{ ms}$ $v_{R-n} = 0,8 \times V_{R-n}$	$T_{R-1} = 2,5 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 3,0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 2,5 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 12 \text{ ms}$ $v_{R-n} = 0,8 \times V_{R-n}$	$T_{R-1} = 2,5 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 3,0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 2,5 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 5,3 \text{ ms}$ $v_{R-n} = 0,8 \times V_{R-n}$	$T_{R-1} = 2,5 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 3,0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 2,5 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 2 \text{ ms}$ $v_{R-n} = 0,8 \times V_{R-n}$
<p>Corrente de Soldagem (A) ($V_{R(0)}; P_{(0)}$)</p>	(A7)	$T_{R-1} = 5 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 5 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 30 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 5 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 5 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 10 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 5 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 5 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 3,3 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 5 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 5 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 0 \text{ ms}$

estabilidade na transferência de massa e no comprimento do arco elétrico o menor possível. Essas observações foram feitas a olho nu.

3.- A determinação da velocidade de alimentação do arame para cada valor de frequência e forma de onda retangular adotada como padrão, obtendo-se transferência estável. O valor da velocidade de alimentação do arame para uma determinada frequência é mantido constante quando utilizada outra forma de onda, diferente da retangular. Com isso observou-se que o valor da tensão média do processo varia conforme a forma de onda utilizada, para uma mesma frequência produzindo instabilidade no caso de algumas formas de onda, resultando em um excessivo nível de salpico.

Para a realização dos cordões de solda “bead-on-plate” foi adotada a segunda situação acima descrita. Depois foi aplicado um projeto fatorial totalmente cruzado e, aleatoriamente, foram executados os 28 cordões de solda “bead-on-plate”, como mostra a Tabela 6, sobre o metal base de aço baixo carbono com sete formas de onda diferentes, para cada valor de frequência da onda (25, 50, 75 e 100 Hz).

Na Tabela 6 são mostradas as combinações de tratamento, que estão dadas pelos níveis dos fatores “**AiBj**” acima definidos e a sequência para a realização do cordão de solda “bead-on-plate”, 1G. Por exemplo: A2B4 representa a forma da onda trapezoidal (A2) e frequência (B4) $F = 100$ Hz.

Tab.6: Combinação de tratamento dada pelos níveis dos parâmetros “**AiBj**” e a sequência para a realização do cordão de solda “bead-on-plate”, posição plana.

Forma da Onda de Controle da Fonte	Frequência da Onda de Tensão de Controle da Fonte (F)			
	25 Hz (B1)	50 Hz (B2)	75 Hz (B3)	100 Hz (B4)
Retangular (A1)	[A1B1] 5	[A1B2] 10	[A1B3] 24	[A1B4] 12
Trapezoidal (A2)	[A2B1] 16	[A2B2] 26	[A2B3] 21	[A2B4] 28
Dente de Serra (A3)	[A3B1] 11	[A3B2] 8	[A3B3] 13	[A3B4] 22
Composta Crescente (A4)	[A4B1] 17	[A4B2] 4	[A4B3] 2	[A4B4] 19
Composta Decrescente (A5)	[A5B1] 15	[A5B2] 14	[A5B3] 9	[A5B4] 18
Combinada, Ret.-Trap., (A6)	[A6B1] 27	[A6B2] 6	[A6B3] 3	[A6B4] 23
Triangular (A7)	[A7B1] 7	[A7B2] 25	[A7B3] 20	[A7B4] 1

Os corpos de prova (metal base) foram obtidos da chapa original utilizando oxicorte, com as dimensões citadas na Tabela 4. Antes de realizar os cordões de solda “bead-on-plate”, posição plana, os corpos de prova foram devidamente limpos.

Os corpos de prova para metalografia foram cortados na seção transversal ao cordão de solda e, posteriormente lixados, empregando lixadeira manual por via úmida e lixas nas granas: 220, 320, 400, 600 e 1000.

As macrografias foram obtidas usando Nital a 2 %.

Os perfis da área transversal dos cordões de solda foram obtidos empregando um projetor de perfil com aumento de x20. O projetor de perfil usado, Mitutoyo PJ-300 H, é um aparelho de medição muito versátil, e pode ser usado em grandes gamas de ampliações (x10, x20, x50 e x100). Os perfis obtidos foram digitalizados utilizando uma mesa digitalizadora, para posteriormente, realizar as medições das áreas de fusão. O processamento das imagens dos perfis foram feitos utilizando o aplicativo AutoCAD® R.12, da Autodesk™.

Quatro perfis foram digitalizados da seção transversal ao cordão de solda, para cada frequência e forma de onda da tensão de controle, e cordão de solda “bead-on-plate”.

Três perfis foram digitalizados da seção transversal ao cordão de solda, para cada combinação de tratamento e forma de onda do cordão de solda em filete.

11.2.- Cordões de Solda em Junta Filete

Nessa fase, escolheram-se três formas de onda diferentes, e cada uma foi estudada individualmente mediante a variação da frequência e tensão de pico da onda de controle da fonte de soldagem, para tanto foram mantidos constantes os seguintes parâmetros durante a realização da experiência, mostrados na Tabela 7.

Tab.7: Parâmetros operacionais utilizados durante a realização dos cordões de solda em filete, posição plana (1F).

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
Distância bico de contato-metal base	20 mm
Eletrodo: diâmetro, material	1,2 mm; (AWS A5.18-79) ER70 S-6
Vazão e tipo de gás	20 l/min; Ar+4%CO ₂
Metal base	Aço baixo carbono (SAE 1020)
Dimensão do Metal Base (M.B.)	2x(270x80x9,6 mm)
Temperatura dos M.B.	Ambiente
Tensão de Controle da V_{R-b}, na saída do D/A	0,6 V
Velocidade de soldagem (V_s)	4 mm/s
Tipo de junta e posição	Filete, posição plana (1F)
Polaridade	Eletrodo Positivo (CCEP)
Ângulo da tocha	0°
Condução da tocha	Dispositivo Mecanizado

Os corpos de prova (metal base) foram obtidos da chapa original utilizando oxicorte, com as dimensões citadas na Tabela 7. Antes de realizar os cordões de solda em filete, os corpos de prova foram devidamente limpos.

Estudou-se o efeito da frequência e tensão de controle de pico da fonte de soldagem de cada uma das três formas de onda sobre as características de fusão dos cordões de solda em filete, posição plana (1F). Esses cordões foram realizados aplicando-se um método de planejamento fatorial totalmente cruzado.

Na Fig.61 mostra-se um esquema do metal base e dimensões dos corpos de prova extraídos para realizar a metalografia, com as seguintes descrições:

- (1).- Distância bico de contato-metal base;
- (2).- Corpo de prova (metal base);
- (3).- Arame (continuamente alimentado);
- (4).- Bico de contato;
- (5).- Bocal.

A-A.- Vista do corte transversal do cordão de solda para a determinação dos perfis.

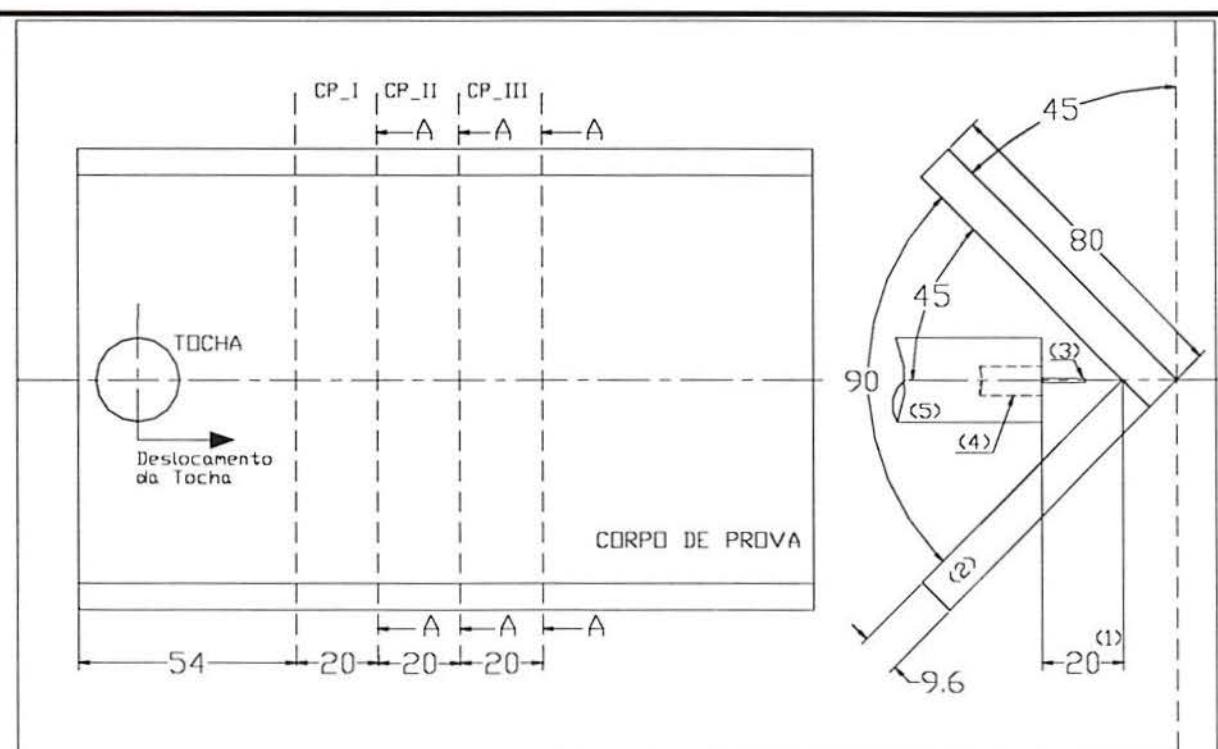


Fig.61: Esquema do metal base e dimensões dos corpos de prova extraídos para metalografia (todas as unidades de comprimento em mm e os ângulos em graus).

11.2.1.- Forma de Onda Retangular (A1)

Foram realizados vários cordões de solda em junta filete, posição plana (1F), preliminares para poder estabelecer os parâmetros a serem fixados e definir seus valores.

A seguir são apresentados os parâmetros controláveis utilizados na realização dos diversos cordões de solda:

♦ **Fator A:** Frequência da onda de tensão de controle da fonte (F),

cinco níveis fixos de F : 100, 150, 200, 250 e 300 Hz;

♦ **Fator B:** Tensão de controle de pico da fonte (V_{R-p}),

três níveis fixos de V_{R-p} : 7,5, 8,0 e 8,5 V.

A área abaixo do pulso (vide Fig.62, para o tempo T_{R-2}) da tensão de controle da fonte foi mantida constante para cada nível de tensão de controle de pico. A variação do nível da frequência foi realizada mediante a alteração do valor de duração do tempo T_{R-4} . Portanto, o parâmetro de controle da frequência na realização dos cordões de solda em filete foi T_{R-4} . Na Tabela 8, são mostrados os valores dos parâmetros de tempo da onda de controle da fonte de soldagem, para cada combinação de tratamento.

A velocidade de alimentação do arame foi ajustada para otimizar cada combinação de tratamento, visando monitorar a periodicidade dos valores instantâneos da corrente de soldagem e tensão do processo em função do tempo, bem como a estabilidade na transferência de massa e no comprimento do arco elétrico o menor possível. Essas observações foram feitas a olho nu.

Os tempos T_{R-1} e T_{R-3} , mostrados na Tabela 8 como iguais a zero, na prática não são, porque existe um tempo necessário para o sinal passar de V_{R-b} a V_{R-p} e vice-versa, esse tempo varia de 56 até 110 μ s.

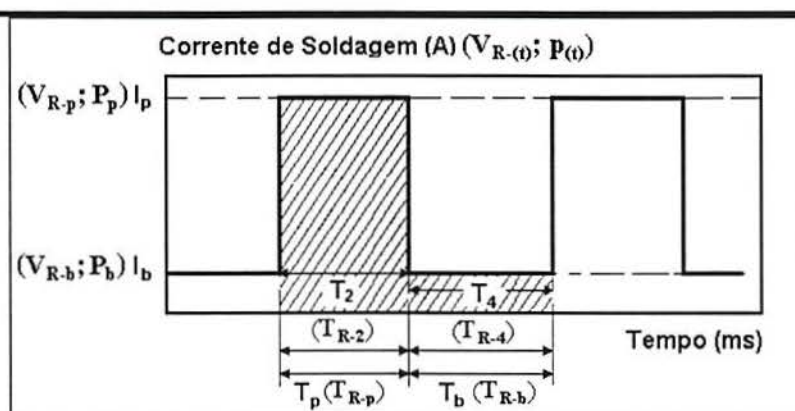


Fig.62: Parâmetros da onda da tensão de controle da fonte (corrente de soldagem e potência do sistema), forma de onda retangular (A1).

Tab.8: Parâmetros de tempo da onda de tensão de controle da fonte de soldagem, para cada combinação de tratamento (frequência da onda e tensão de controle de pico da fonte).

Frequência da Onda	Tensão de Controle de Pico, V_{R-p} , da Fonte		
	7,5 V	8,0 V	8,50 V
$F = 100 \text{ Hz}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 2,50 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 7,50 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 2,50 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 7,50 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 2,50 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 7,50 \text{ ms}$
$F = 150 \text{ Hz}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 2,50 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 4,16 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 2,50 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 4,16 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 2,50 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 4,16 \text{ ms}$
$F = 200 \text{ Hz}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 2,50 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 2,50 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 2,50 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 2,50 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 2,50 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 2,50 \text{ ms}$
$F = 250 \text{ Hz}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 2,50 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 1,50 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 2,50 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 1,50 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 2,50 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 1,50 \text{ ms}$
$F = 300 \text{ Hz}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 2,50 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 0,83 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 2,50 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 0,83 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 2,50 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 0,83 \text{ ms}$

11.2.2.- Forma de Onda Composta Decrescente (A5)

Foram realizados vários cordões de solda em junta tipo filete, posição plana (1F), preliminares para estabelecer os parâmetros a serem fixados e definir seus valores.

A seguir são apresentados os parâmetros controláveis utilizados na realização dos diversos cordões de solda:

♦ **Fator A:** Frequência da onda de tensão de controle da fonte (F),

quatro níveis fixos de F : 100, 150, 200 e 250 Hz;

♦ **Fator B:** Tensão de controle de pico da fonte (V_{R-p}),

três níveis fixos de V_{R-p} : 7,5, 8,0 e 8,5 V.

A área abaixo do pulso (vide Fig.63, para os tempos T_{R-2} e T_{R-3}) da tensão de controle da fonte foi mantida constante para cada nível de tensão de controle de pico. A variação de nível da frequência foi realizada mediante a alteração do valor de duração do tempo T_{R-4} . Portanto, o parâmetro de controle da frequência foi T_{R-4} na realização dos cordões de solda em filete. Na Tabela 9, são mostrados os valores dos parâmetros de tempo da onda de controle da fonte de soldagem, para cada combinação de tratamento.

A velocidade de alimentação do arame foi ajustada para otimizar cada combinação de tratamento, visando monitorar a periodicidade dos valores instantâneos da corrente de soldagem e tensão do processo em função do tempo, bem como a estabilidade na transferência de massa e no comprimento do arco elétrico o menor possível. Essas observações foram feitas a olho nu.

É importante frisar que o tempo T_{R-1} , mostrado na Tabela 9 igual a zero, na prática não é, porque existe um tempo necessário para o sinal passar de V_{R-b} a V_{R-p} , esse tempo varia de 56 até 110 μ s.

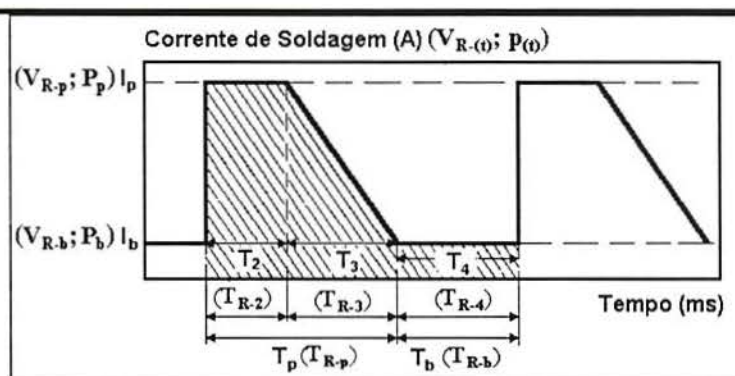


Fig.63: Parâmetros da onda da tensão de controle da fonte (corrente de soldagem e potência do sistema), forma de onda composta decrescente (A5).

Tab.9: Parâmetros de tempo da onda de tensão de controle da fonte de soldagem, para cada combinação de tratamento (frequência da onda e tensão de controle de pico da fonte).

Frequência da Onda	Tensão de Controle de Pico, V_{R-p} , da Fonte.		
	7,5 V	8,0 V	8,5 V
$F = 100 \text{ Hz}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 6,0 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 6,0 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 6,0 \text{ ms}$
$F = 150 \text{ Hz}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 2,67 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 2,67 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 2,67 \text{ ms}$
$F = 200 \text{ Hz}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 1,0 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 1,0 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 1,0 \text{ ms}$
$F = 250 \text{ Hz}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 0 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 0 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 0 \text{ ms}$

11.2.3.- Forma de Onda Triangular (A7)

Foram realizados vários cordões de solda em junta tipo filete, posição plana (1F) preliminares, para estabelecer os parâmetros a serem fixados e definir seus valores.

A seguir são apresentados os parâmetros controláveis utilizados na realização dos diversos cordões de solda:

♦ **Fator A:** Frequência da onda de tensão de controle da fonte (F),

cinco níveis fixos de F : 100, 150, 200, 250 e 300 Hz;

♦ **Fator B:** Tensão de controle de pico da fonte (V_{R-p}),

três níveis fixos de V_{R-p} : 7,5, 8,0 e 8,5 V.

Na Tabela 10, são mostrados os valores dos parâmetros de tempo da onda de controle da fonte de soldagem, para cada combinação de tratamento.

A velocidade de alimentação do arame foi ajustada para otimizar cada combinação de tratamento, visando monitorar a periodicidade dos valores instantâneos da corrente de soldagem e tensão do processo em função do tempo, bem como a estabilidade na transferência de massa e no comprimento do arco elétrico o menor possível. Essas observações foram feitas a olho nu.

Para cada combinação de tratamento os valores de T_{R-2} e T_{R-4} foram mantidos nulos (vide Tabela 10). Os valores dos tempos de crescimento (T_{R-1}) e decréscimo (T_{R-3}) foram alterados para cada valor de frequência (F), como mostra a Fig.64. A taxa de crescimento varia conforme a frequência e a tensão de controle de pico.

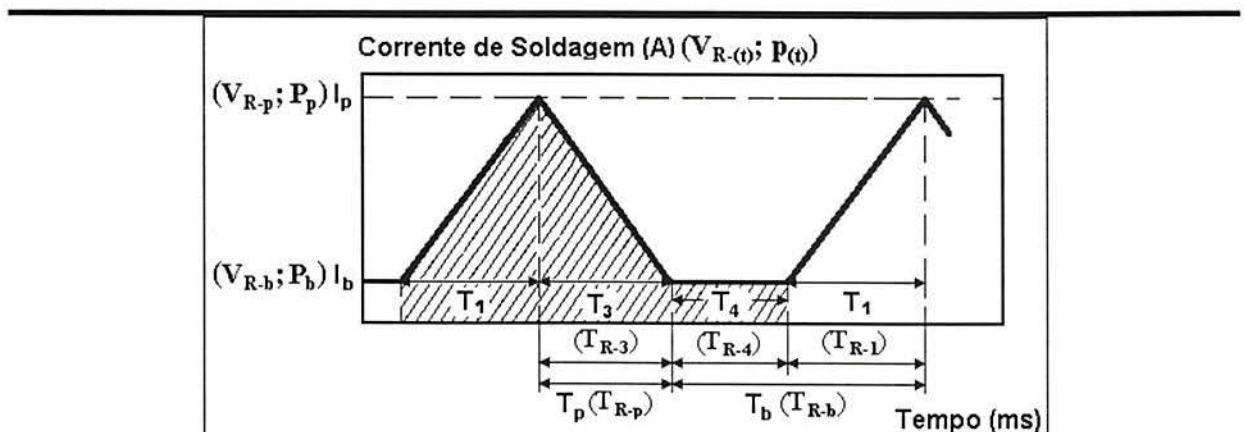


Fig.64: Parâmetros da onda da tensão de controle da fonte (corrente de soldagem e potência do sistema), forma de onda triangular (A7).

Tab.10: Parâmetros de tempo da onda de tensão de controle da fonte de soldagem, para cada combinação de tratamento (frequência da onda e tensão de controle de pico da fonte).

Frequência da Onda	Tensão de Controle de Pico, V_{R-p} , da Fonte.		
	7,5 V	8,0 V	8,5 V
$F = 100 \text{ Hz}$	$T_{R-1} = 5,0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 5,0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 0 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 5,0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 5,0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 0 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 5,0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 5,0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 0 \text{ ms}$
$F = 150 \text{ Hz}$	$T_{R-1} = 3,33 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 3,33 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 0 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 3,33 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 3,33 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 0 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 3,33 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 3,33 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 0 \text{ ms}$
$F = 200 \text{ Hz}$	$T_{R-1} = 2,50 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 2,50 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 0 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 2,50 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 2,50 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 0 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 2,50 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 2,50 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 0 \text{ ms}$
$F = 250 \text{ Hz}$	$T_{R-1} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 0 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 0 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 2,0 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 0 \text{ ms}$
$F = 300 \text{ Hz}$	$T_{R-1} = 1,67 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 1,67 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 0 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 1,67 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 1,67 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 0 \text{ ms}$	$T_{R-1} = 1,67 \text{ ms}$ $T_{R-2} = 0 \text{ ms}$ $T_{R-3} = 1,67 \text{ ms}$ $T_{R-4} = 0 \text{ ms}$

12.- RESULTADOS E DISCUSSÃO

12.1.- Cordões de Solda Depositados sobre a Chapa (“Bead-on-Plate”)

12.1.1.- Efeito da Frequência e Forma da Onda de Tensão de Controle da Fonte de Soldagem Sobre a Corrente Média de Soldagem

Diferenças no comportamento na estabilidade do arco e transferência de massa, têm efeito sobre as características do cordão de solda realizado com (teoricamente) idênticos valores de parâmetros de pulso e diferentes fontes de soldagem. Alguns estudos realizados /47, 50, 59/ concluíram, que na ausência de fatores externos, essas diferenças podem ser geradas a partir da interação da fonte de soldagem com a resposta dinâmica da mesma.

Geralmente, quando a forma de onda do pulso é retangular, os parâmetros fornecidos são: I_p , I_b , T_p e T_b , considerando que a fonte tem uma taxa de resposta $[\Delta I/\Delta T]$ infinita. Isso pode conduzir a uma diferença significativa na característica avaliada, com iguais valores de parâmetros e diferentes fontes de soldagem.

Na prática, a taxa de resposta da fonte para soldagem não é tão alta como no caso ideal, significando que tem um valor finito $[\Delta I/\Delta T]$. No presente estudo, foram apresentados conceitos e fórmulas matemáticas para o cálculo e análise da corrente média de soldagem, tensão do processo, potência média do sistema e energia média de soldagem, taxa média de fusão do arame, entre outros, os quais foram discutidos no Cap.9, especificamente para o processo MIG/MAG pulsado. Essas fórmulas poderão ser utilizadas para outros processos ao arco elétrico, onde a forma do sinal de saída da fonte de soldagem não seja constante em função do tempo, mas com a condição de que seja periódica.

As amostras dos sinais da corrente de soldagem, obtidas do sensor Hall, e da tensão do processo foram adquiridas em um total de quatro para cada forma e frequência da onda de tensão de controle utilizada na execução dos cordões de solda “bead-on-plate”, posição plana. Essas aquisições foram realizadas em diferentes tempos durante a soldagem.

Os valores da velocidade de alimentação do arame, durante a realização dos cordões de solda não foram estritamente constante em função do tempo, apresentando pequenas oscilações ($\pm 0,0127$ m/min). Isto pode ser devido à característica do sistema de alimentação de arame da fonte de soldagem, ou à interação da corrente de soldagem com seu próprio campo magnético.

Na Tabela 11 apresenta-se a análise de variância (ANOVA) para a resposta simples da corrente média de soldagem e níveis fixos. Essa Tabela contém: Fator; Graus de Liberdade (**GDL**); Soma de Quadrados (**SQ**); Média Quadrada (**MQ**); Valores de F_{cal} e F_{tab} ; (os últimos dois fatores

são auxiliares para realizar o teste de significância); e se a variabilidade do fator é ou não significativa.

Para se obter F_{cal} , é necessário fazer a divisão das médias quadradas dos fatores e interações pelo valor correspondente ao termo de resíduo. Foram analisados dois fatores e a interação dos mesmos. Os valores de F_{tab} são obtidos a partir de tabelas de distribuição “F”, para um nível de significância (neste trabalho empregou-se $\alpha = 0,05$) e seu respectivo grau de liberdade (v_1, v_2); $F_{\alpha(v_1, v_2)} = F_{tab} / 89$. Realizando a comparação de F_{cal} com F_{tab} para os fatores e interações, se: $F_{cal} > F_{tab}$, o fator apresenta variabilidade significativa, caso contrário a variabilidade não é significativa.

Os princípios gerais para a interpretação da análise de variância da Tabela 11 são:

- ♦ O efeito do fator principal deve-se à mudança do valor médio da observação de um nível a outro, fazendo-se a média sobre os outros níveis dos fatores.
- ♦ A ausência de interação entre os fatores significa que o valor médio de um fator não apresenta variabilidade significativa para todos os níveis do segundo fator.

Na Tabela 11 apresenta-se a análise de variância para os valores da corrente média de soldagem ($I_m - A$), onde o valor da distribuição $F_{0,05;18;84} = 1,75$, para a interação da forma e frequência da onda sobre a corrente média de soldagem é significativo. Os fatores principais, forma e frequência de onda são significativos sobre a corrente média de soldagem, com os valores tabelados da distribuição $F_{0,05;6;84} = 2,22$ e $F_{0,05;3;84} = 2,73$, respectivamente.

Tab.11: Análise de variância (ANOVA) para valores da corrente média de soldagem ($I_m - A$).

Fonte de Variação	SQ	GDL	MQ	F_{cal}	F_{tab}	Significativo
Forma de Onda	8071,08	6	1345,18	291,942	> 2,22	Signif.
Frequência	83035,77	3	27678,59	6007,012	> 2,73	Signif.
Interação	2843,28	18	157,96	34,281	> 1,75	Signif.
Resíduo	387,048	84	4,607714			
Total	94337,18	111				

Para melhor entender os resultados da análise de variância (ANOVA) da Tabela 11, são plotados em um gráfico os valores da corrente média de soldagem para cada combinação de tratamento, como se mostra na Fig.65. Cada valor médio plotado de corrente média de soldagem mostrado na Fig.65 foi obtido a partir de quatro observações. O efeito significativo da interação é indicado pela falta de paralelismo das linhas (resposta). Em geral, baixos valores de corrente média de soldagem (de 81 a 91 A) são obtidos quando a frequência da onda é de 25 Hz, independente da forma de onda da tensão de controle da fonte utilizada. Incrementando a frequência para valores intermediários, de 25 para 50 ou 75 Hz, o aumento da corrente média utilizando a forma de onda

retangular (A1) é maior do que para as outras formas de onda. Para a $F = 50$ Hz, os valores da corrente média de soldagem para cada forma de onda são: (A1; $I_m \approx 123$ A), (A2; $I_m \approx 116$ A), (A3; $I_m \approx 107$ A), (A4; $I_m \approx 116$ A), (A5; $I_m \approx 116$ A), (A6; $I_m \approx 114$ A) e (A7; $I_m \approx 104$ A). Aumentando a frequência de 50 a 75 Hz, se obtém os seguintes valores médios da corrente média de soldagem para cada forma de onda são: (A1; $I_m \approx 155$ A), (A2; $I_m \approx 137$ A), (A3; $I_m \approx 127$ A), (A4; $I_m \approx 148$ A), (A5; $I_m \approx 140$ A), (A6; $I_m \approx 141$ A) e (A7; $I_m \approx 126$ A). Quando a frequência passa do valor intermediário para 100 Hz, a corrente média aumenta para todas as formas de onda, enquanto que o valor da corrente média para a forma de onda retangular ($I_m \approx 178$ A) é superior, observando-se valores mínimos para as formas de onda dente de serra ($I_m \approx 137$ A) e triangular ($I_m \approx 133$ A), e valores intermediários para as outras formas de onda [(A2; $I_m \approx 167$ A), (A4; $I_m \approx 172$ A), (A5; $I_m \approx 159$ A) e (A6; $I_m \approx 162$ A)].

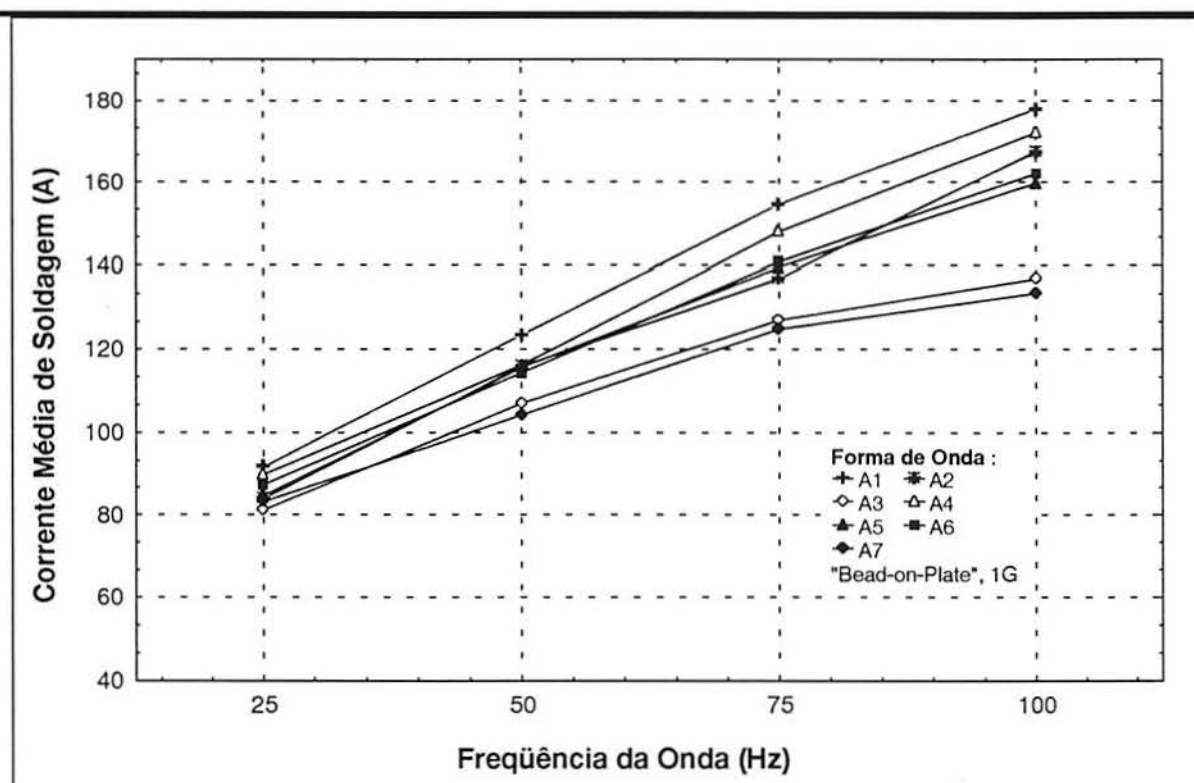


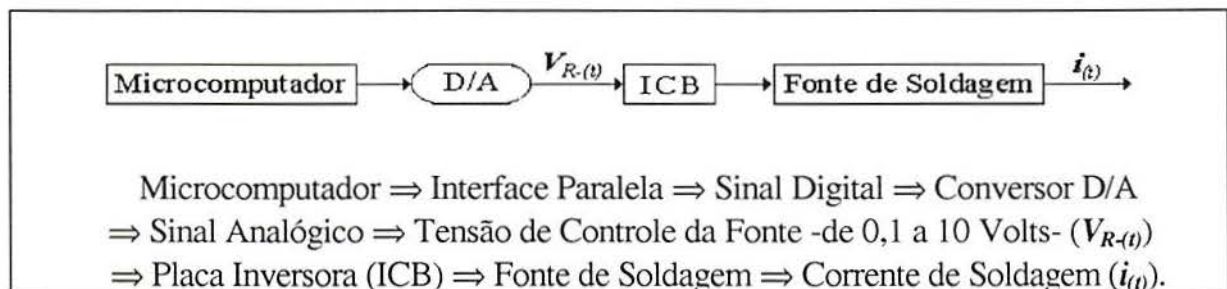
Fig.65: Valores médios observados da corrente média de soldagem em função da frequência e forma da onda de tensão de controle da fonte, cordão de solda "bead-on-plate", 1G.

Resumindo, o efeito da forma de onda da tensão de controle sobre a corrente média de soldagem é significativo, tornando-se ainda maior seu efeito quando a frequência da onda aumenta. Os valores mínimos da corrente média foram obtidos com as formas da onda de tensão de controle da fonte dente de serra (A3) e triangular (A7), isto é, para uma mesma frequência. Sendo que, para igual frequência, os valores médios da tensão de controle da fonte são praticamente iguais. Com

isto, demonstra-se que o efeito da forma da onda de tensão de controle da fonte sobre a corrente média de soldagem é muito importante, utilizando-se a mesma fonte de soldagem.

➤ Devido ao efeito significativo da forma de onda da tensão de controle da fonte sobre a corrente média de soldagem, comparam-se os formatos do pulso da onda de tensão de controle (*senal de entrada* - $V_{R(t)}$) e da corrente de soldagem (*senal de saída* - $i(t)$) em função do tempo, como mostrados nas Figs.66a-66g.

É importante entender a sequência do sinal gerado no microcomputador até a saída da fonte de soldagem:



A função digital é gerada no microcomputador, logo convertida em sinal analógico, que é o sinal de entrada da fonte ($V_{R(t)}$), para depois ser amplificado através da fonte de soldagem, obtendo-se na saída o sinal de corrente de soldagem ($i(t)$). A fonte de soldagem pode ser considerada como amplificador do sinal ($V_{R(t)}$).

Uma fonte (ou amplificador) com resposta (saída- $i(t)$) proporcional e idêntica em forma à entrada $V_{R(t)}$, para qualquer valor de frequência é definido como uma fonte ideal de soldagem, que deve apresentar um valor de ganho constante e zero de defasagem em um amplo espectro de frequência de resposta. Portanto, a fonte reproduz o sinal de entrada para qualquer valor de frequência, com ganho constante. Desvios da forma ideal podem ocorrer na resposta da fonte, que dependem especificamente de cada componente e do projeto eletro/eletrônico da fonte de soldagem.

Segundo resultados obtidos, como mostram as Figs.66a-66g, não foi observado desvio significativo na frequência da onda de saída ($i(t)$) em relação à entrada ($V_{R(t)}$), no entanto, os parâmetros de tempo (T_1 , T_2 e T_3) que compõem o pulso de corrente apresentaram um desvio significativo em relação aos parâmetros de tempo (T_{R-1} , T_{R-2} e T_{R-3}) que compõem o pulso ao sinal de entrada ($V_{R(t)}$).

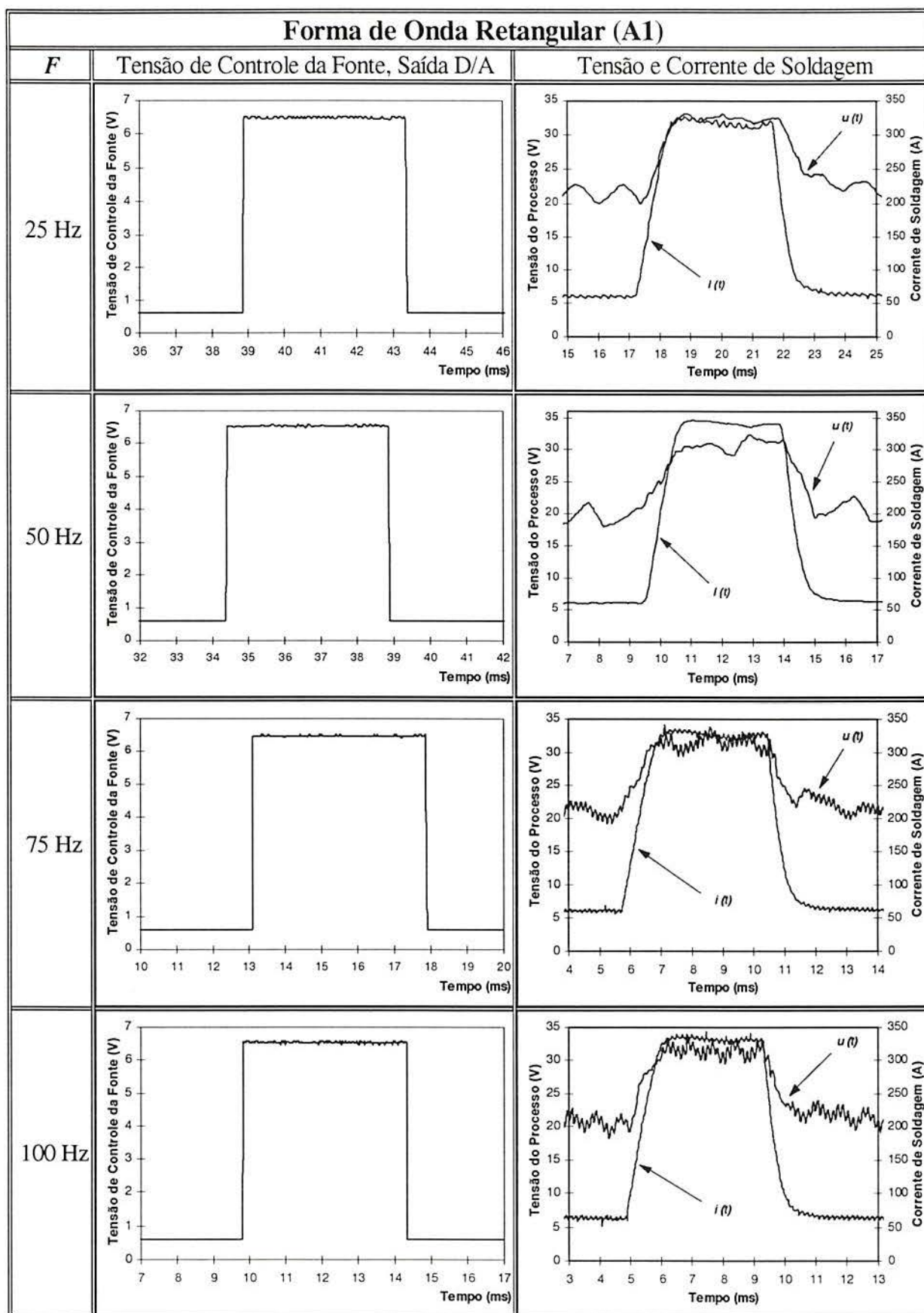


Fig.66a: Comparação dos formatos do pulso da onda entre a tensão de controle da fonte e a corrente de soldagem e tensão do processo em função do tempo.

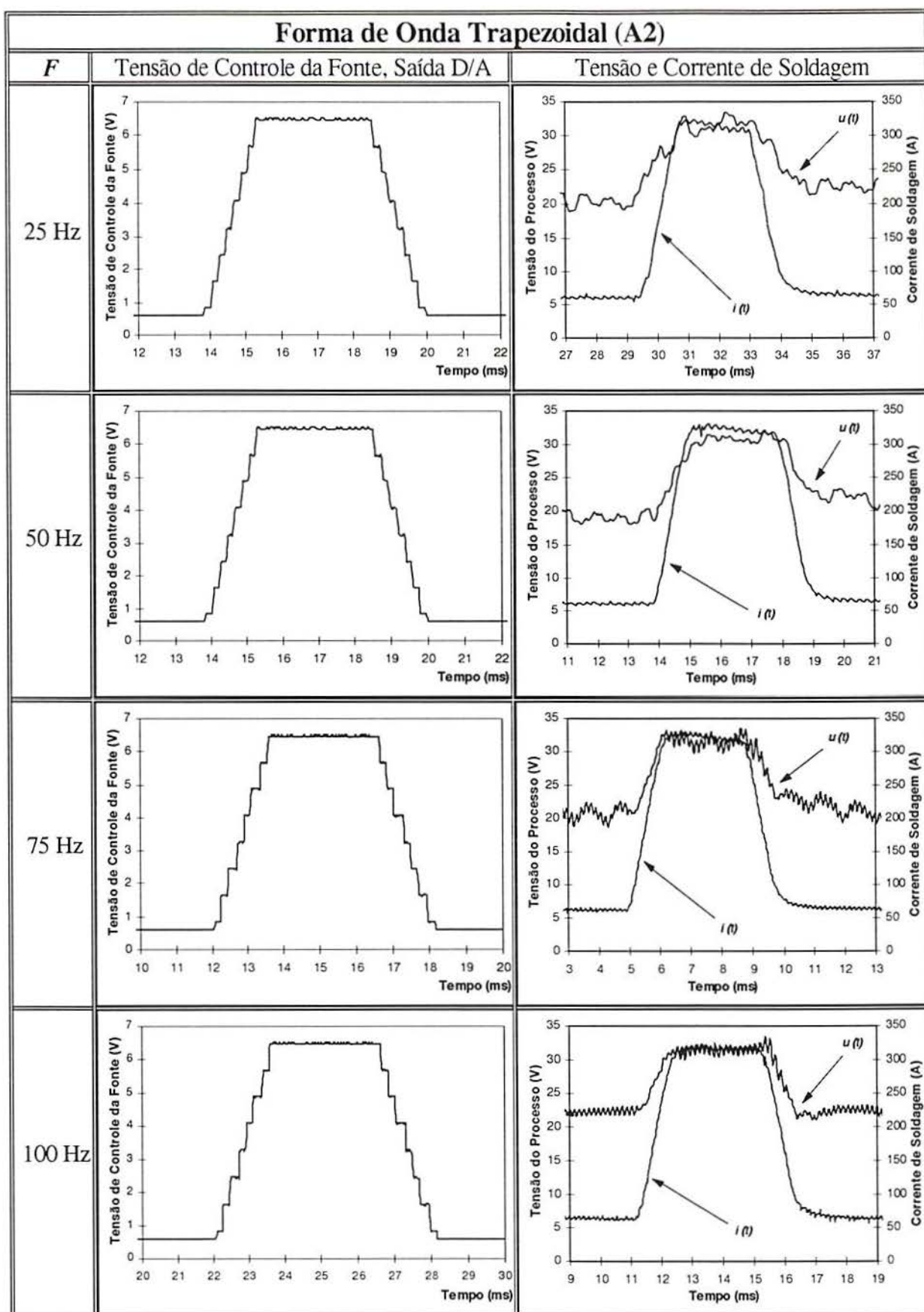


Fig.66b: Comparação dos formatos do pulso da onda entre a tensão de controle da fonte e a corrente de soldagem e tensão do processo em função do tempo.

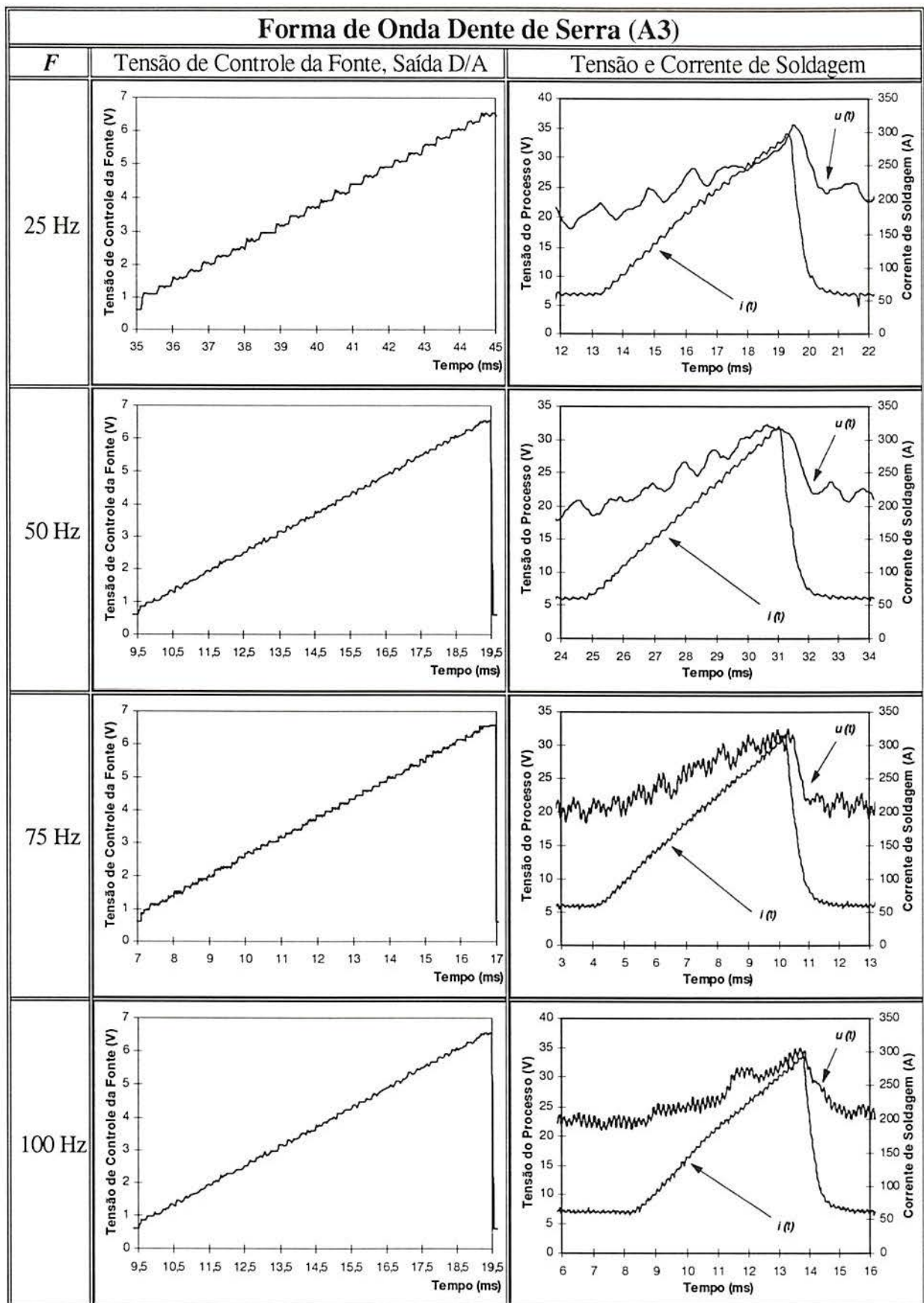


Fig.66c: Comparação dos formatos do pulso da onda entre a tensão de controle da fonte e a corrente de soldagem e tensão do processo em função do tempo.

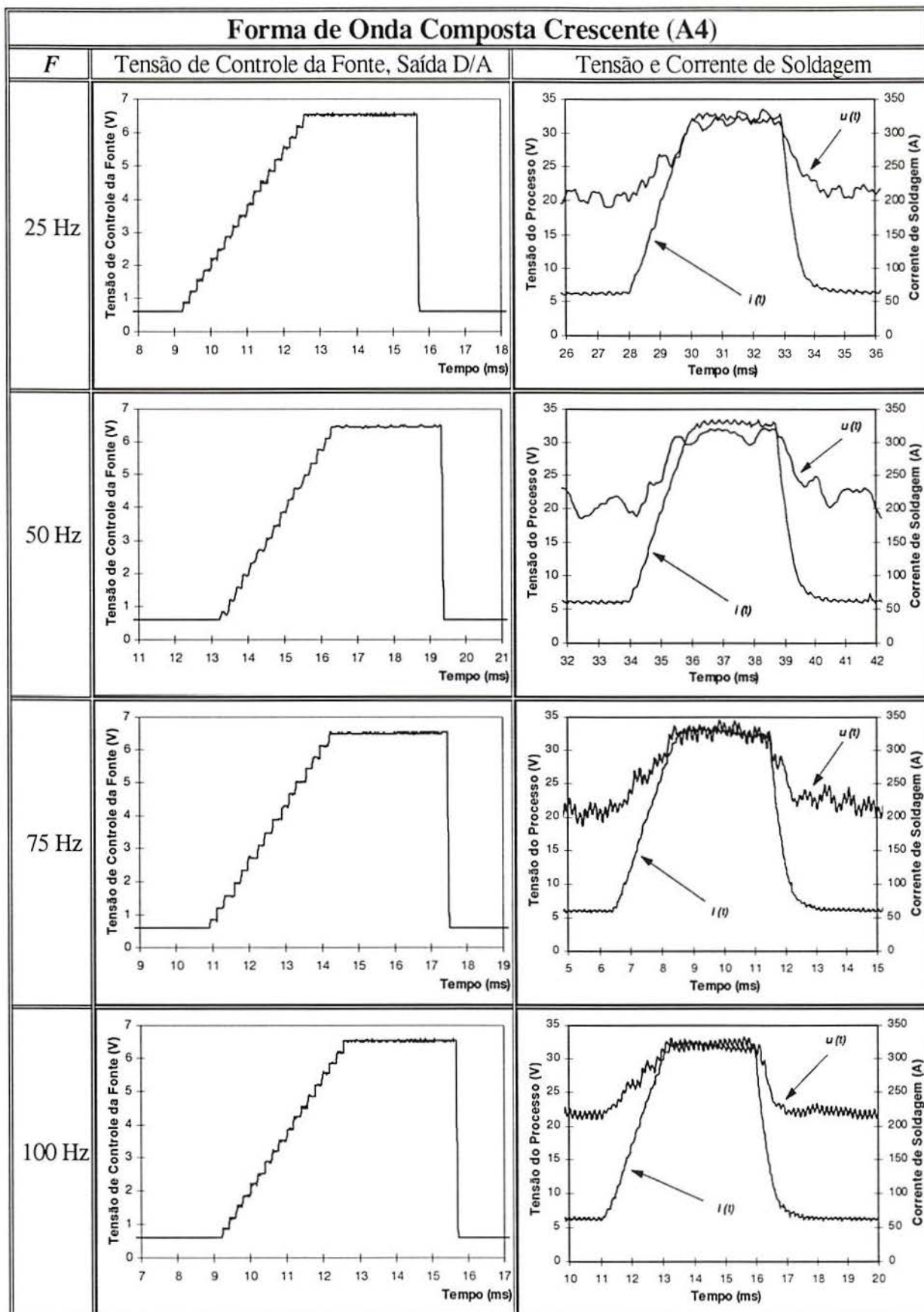


Fig.66d: Comparação dos formatos do pulso da onda entre a tensão de controle da fonte e a corrente de soldagem e tensão do processo em função do tempo.

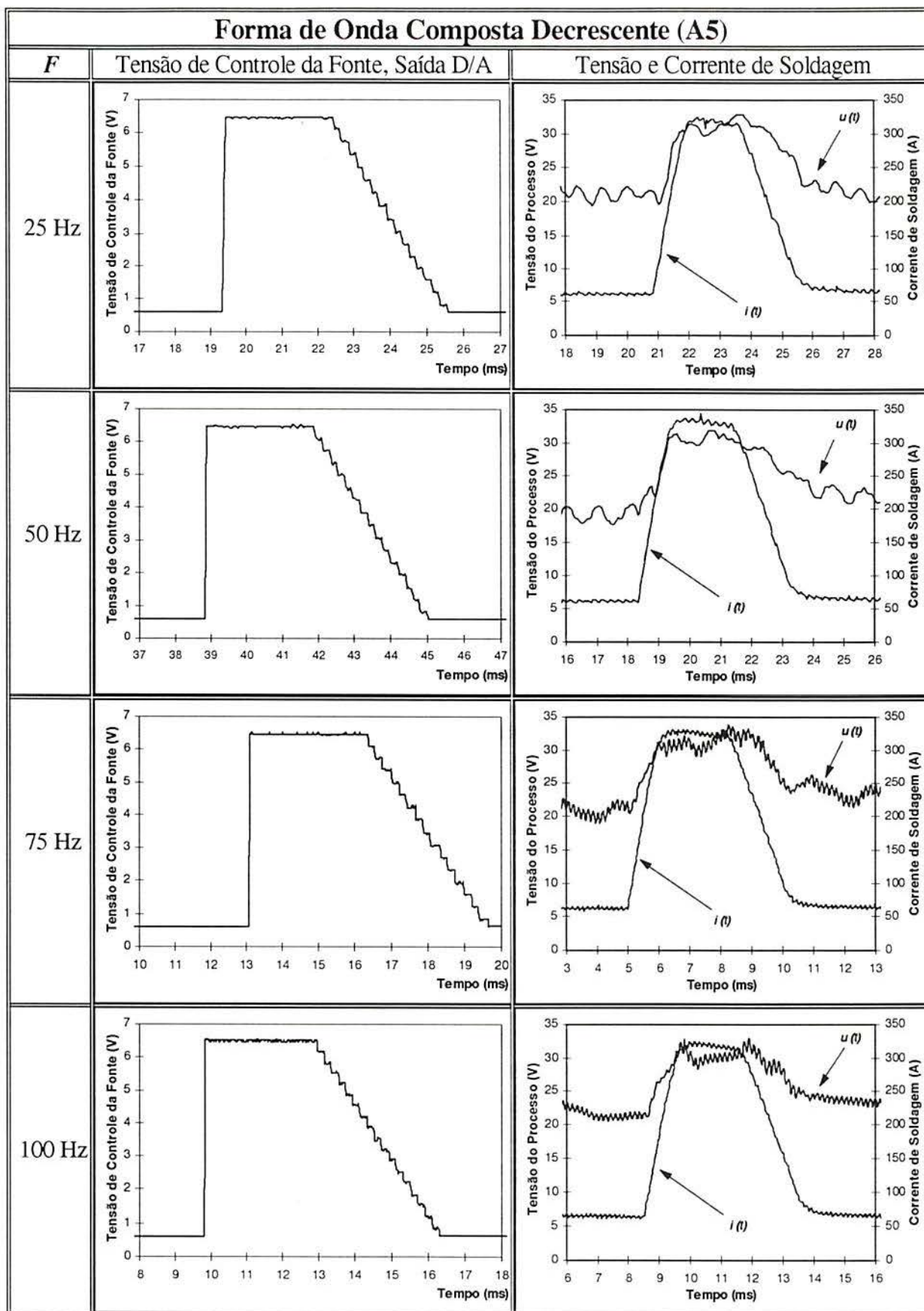


Fig.66e: Comparação dos formatos do pulso da onda entre a tensão de controle da fonte e a corrente de soldagem e tensão do processo em função do tempo.

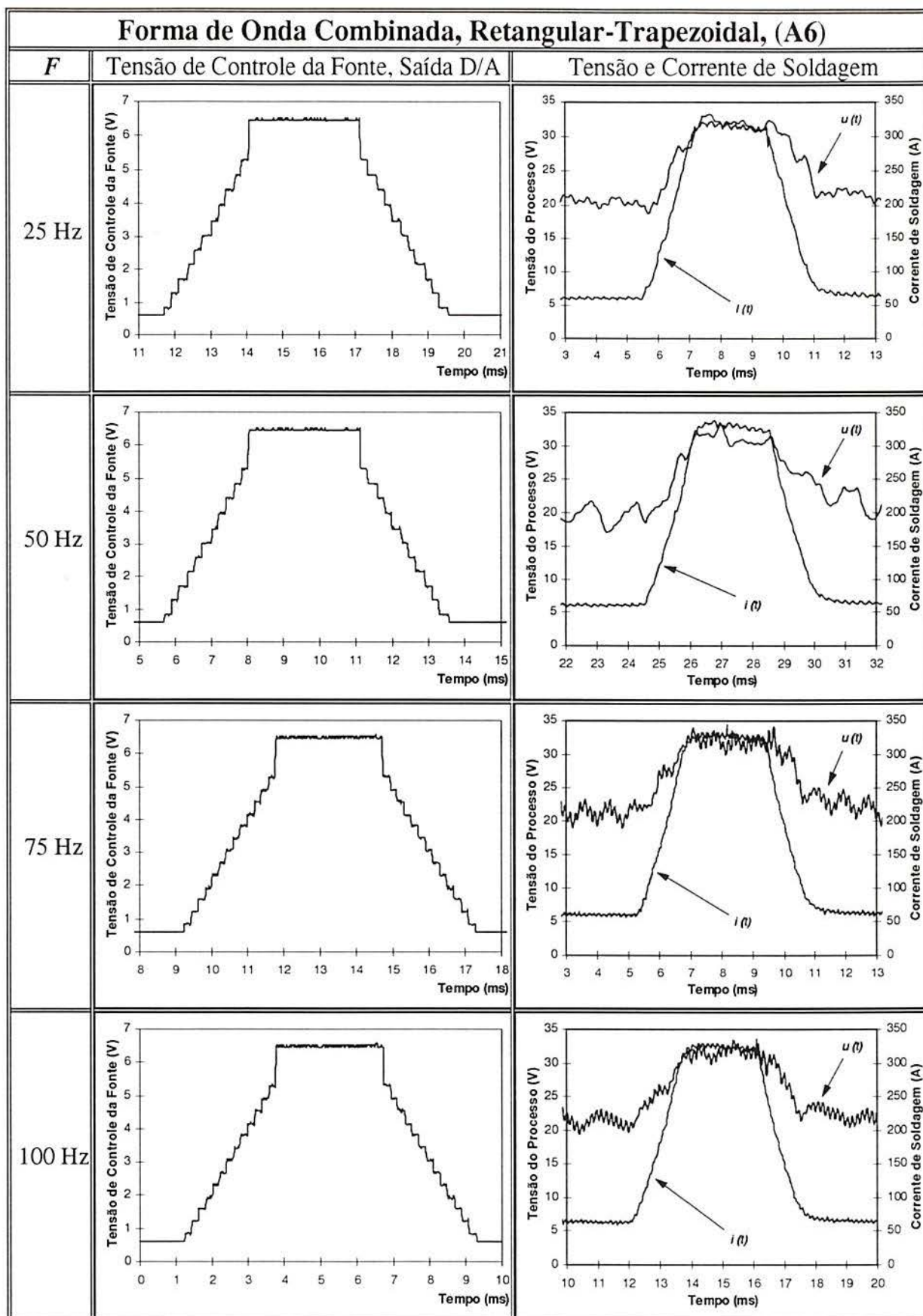


Fig.66f: Comparação dos formatos do pulso da onda entre a tensão de controle da fonte e a corrente de soldagem e tensão do processo em função do tempo.

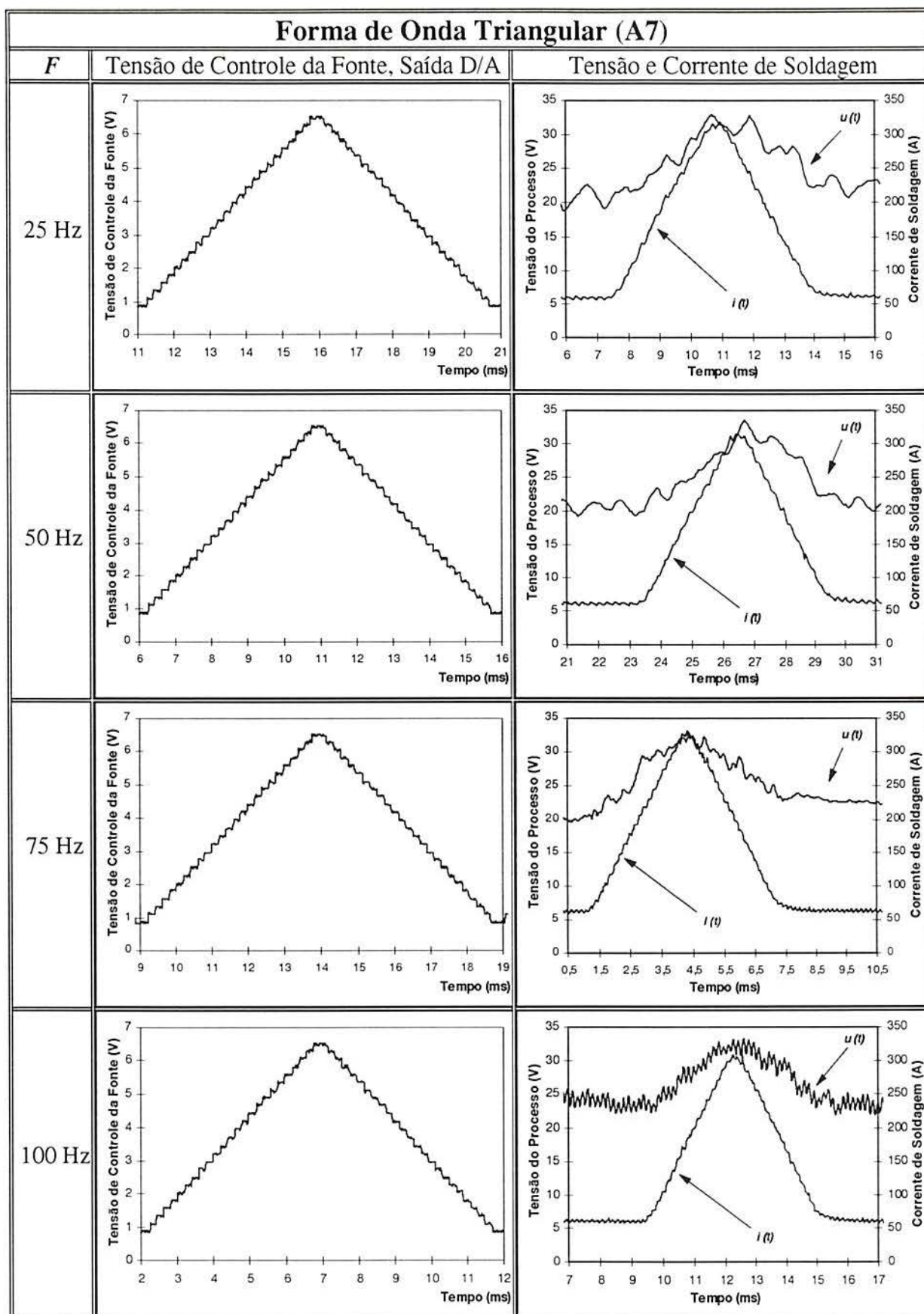


Fig.66g: Comparação dos formatos do pulso da onda entre a tensão de controle da fonte e a corrente de soldagem e tensão do processo em função do tempo.

Utilizando-se as formas de onda dente de serra (A3) e a triangular (A7) no controle da fonte de soldagem, o sinal de saída ($i_{(t)}$) apresentou uma diferença maior nos parâmetros de tempo do pulso (T_1 , T_2 e T_3) em relação à entrada (T_{R-1} , T_{R-2} e T_{R-3}). Valores menores foram observados para as outras formas de onda A1, A2, A4, A5 e A6.

Nos oscilogramas da Fig.66c são mostrados que o tempo necessário para elevar a tensão de controle desde V_{R-b} até V_{R-p} é $T_{R-1} = 10$ ms, já na saída da fonte, o tempo necessário para elevar a corrente de soldagem desde I_b até I_p é T_1 , e aproximadamente igual a 6 ms. Isso demonstra que é essencial determinar os valores reais dos parâmetros, e não trabalhar com os valores do sinal de entrada. A tensão do processo varia conforme a corrente de soldagem, ou seja, para baixo valor de corrente de soldagem a tensão do processo é baixa, e vice-versa.

A maioria dos estudos realizados até o presente consideraram a forma de onda da corrente de soldagem retangular, o que na prática não ocorre.

12.1.2.- Oscilogramas da Potência do Sistema

Os oscilogramas da tensão do processo ($u_{(t)}$) e da corrente de soldagem ($i_{(t)}$) revelaram que a tensão varia (rapidamente) em função da variação da corrente de soldagem, por exemplo: a tensão diminui conforme a corrente de pico (I_p), passando para o valor de base (I_b), como pode ser observado nas Figs.66a-66g. O valor da potência instantânea do sistema ($p_{(t)}$) aumenta mais do que o produto da tensão média pela corrente instantânea de soldagem ($Pot = U_m \cdot i_{(t)}$) como mostram as Figs.67-94. Portanto, a potência média do sistema (P_m) deve ser utilizada na determinação do valor real da potência no processo MIG/MAG pulsado, porque durante a aplicação do pulso de corrente há alteração na corrente instantânea de soldagem, que é acompanhada pela variação da tensão do processo.

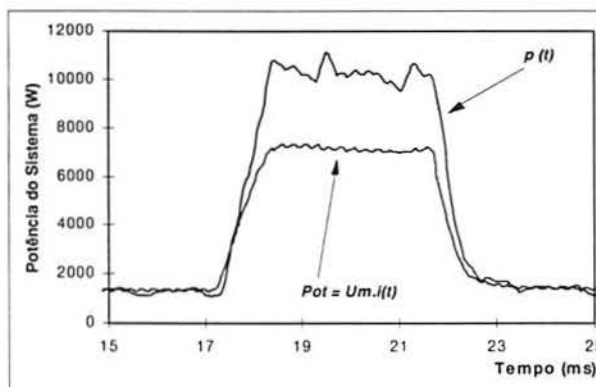


Fig.67: Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (Pot), forma de onda retangular (A1), frequência 25 Hz (B1).

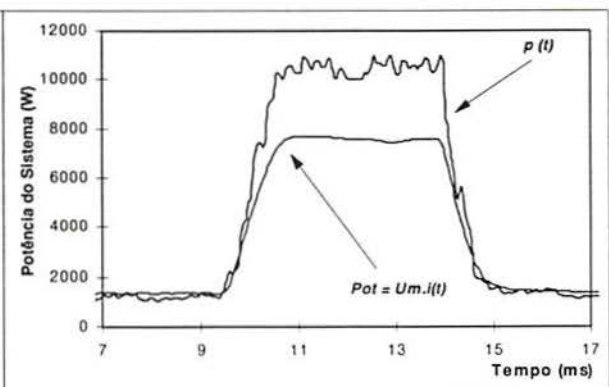


Fig.68: Comparação entre a potência instantânea ($p_{(t)}$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (Pot), forma de onda retangular (A1), frequência 50 Hz (B2).

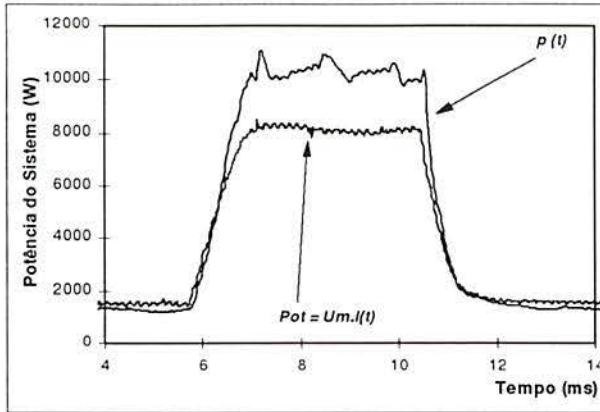


Fig.69: Comparação entre a potência instantânea ($p(t)$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (Pot), forma de onda retangular (A1), frequência 75 Hz (B3).

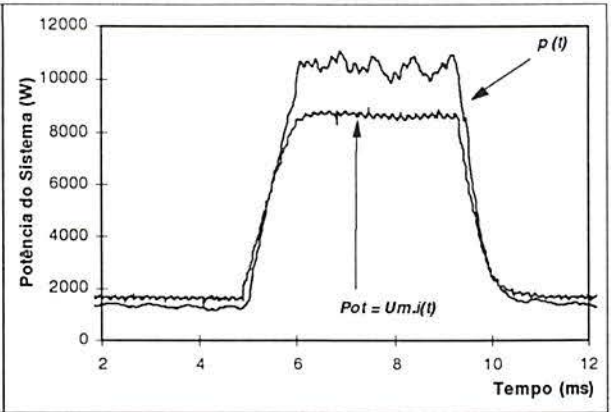


Fig.70: Comparação entre a potência instantânea ($p(t)$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (Pot), forma de onda retangular (A1), frequência 100 Hz (B4).

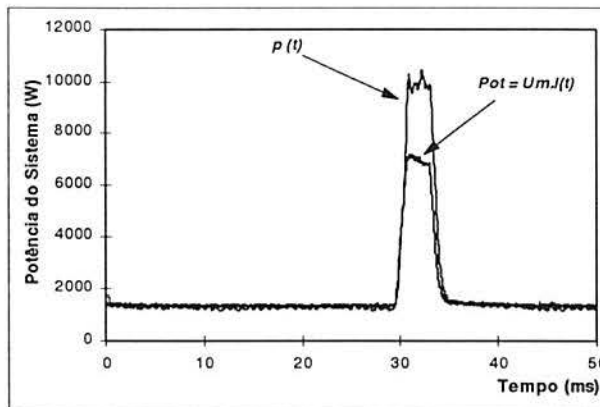


Fig.71: Comparação entre a potência instantânea ($p(t)$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (Pot), forma de onda trapezoidal (A2), frequência 25 Hz (B1).

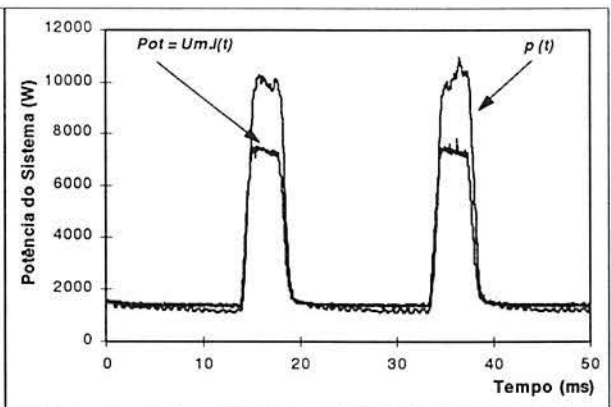


Fig.72: Comparação entre a potência instantânea ($p(t)$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (Pot), forma de onda trapezoidal (A2), frequência 50 Hz (B2).

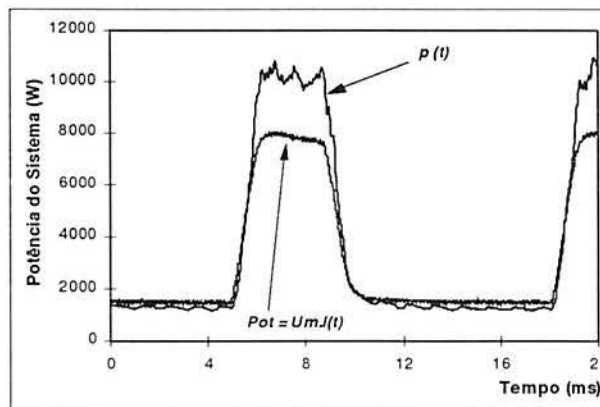


Fig.73: Comparação entre a potência instantânea ($p(t)$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (Pot), forma de onda trapezoidal (A2), frequência 75 Hz (B3).

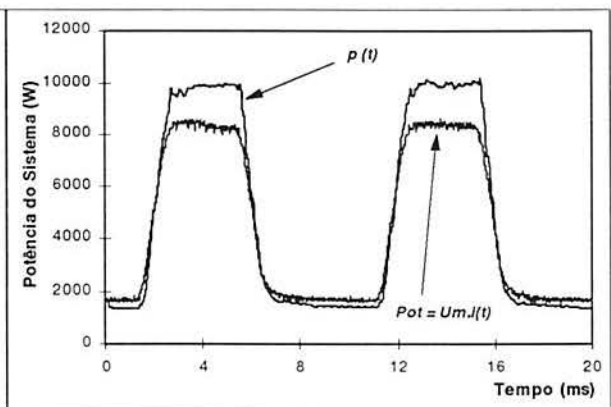


Fig.74: Comparação entre a potência instantânea ($p(t)$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (Pot), forma de onda trapezoidal (A2), frequência 100 Hz (B4).

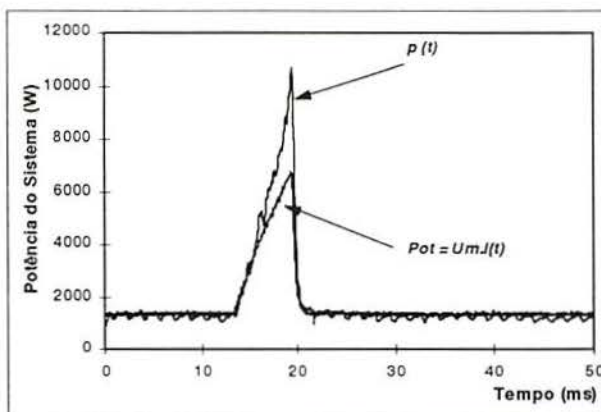


Fig.75: Comparação entre a potência instantânea ($p(t)$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (Pot), forma de onda dente de serra (A3), frequência 25 Hz (B1).

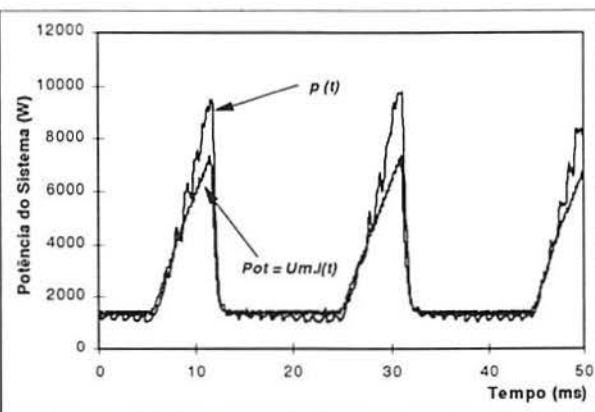


Fig.76: Comparação entre a potência instantânea ($p(t)$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (Pot), forma de onda dente de serra (A3), frequência 50 Hz (B2).

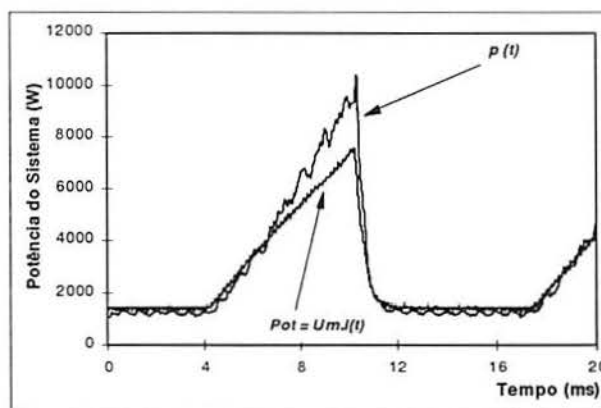


Fig.77: Comparação entre a potência instantânea ($p(t)$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (Pot), forma de onda dente de serra (A3), frequência 75 Hz (B3).

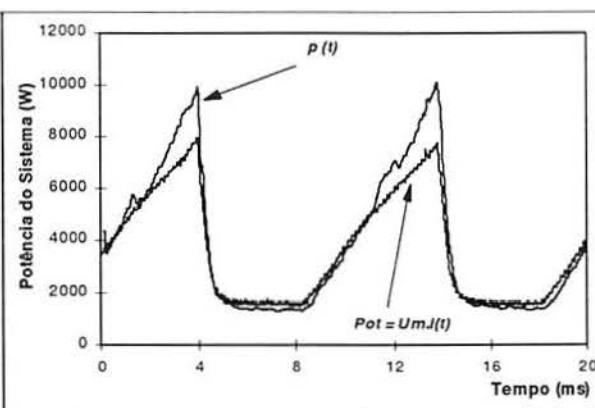


Fig.78: Comparação entre a potência instantânea ($p(t)$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (Pot), forma de onda dente de serra (A3), frequência 100 Hz (B4).

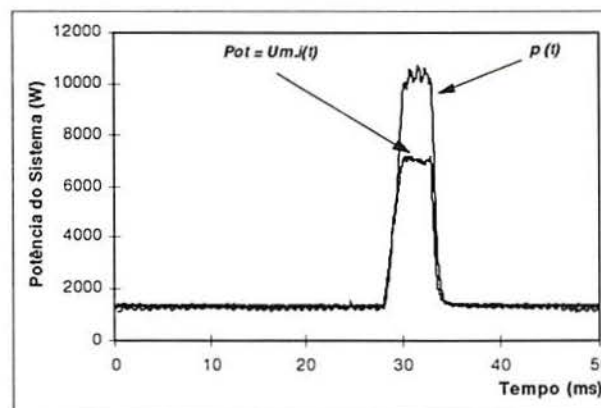


Fig.79: Comparação entre a potência instantânea ($p(t)$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (Pot), forma de onda composta crescente (A4), frequência 25 Hz (B1).

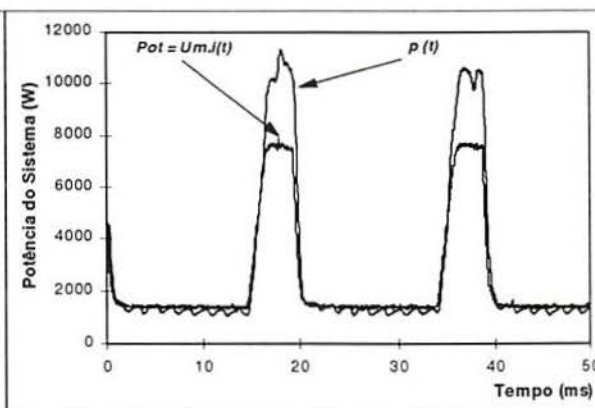


Fig.80: Comparação entre a potência instantânea ($p(t)$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (Pot), forma de onda composta crescente (A4), frequência 50 Hz (B2).

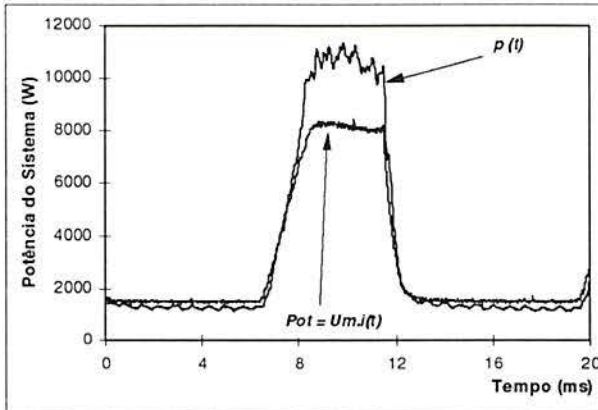


Fig.81: Comparação entre a potência instantânea ($p(t)$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (Pot), forma de onda composta crescente (A4), frequência 75 Hz (B3).

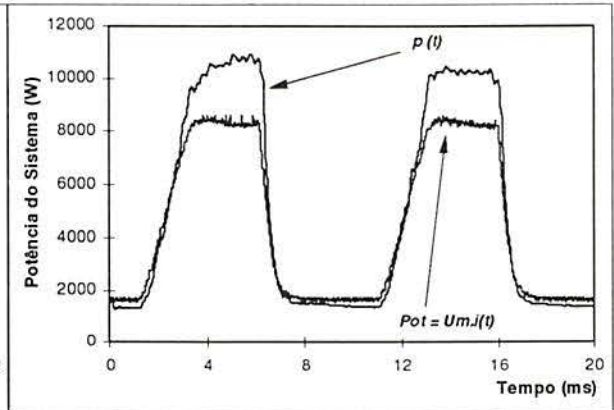


Fig.82: Comparação entre a potência instantânea ($p(t)$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (Pot), forma de onda composta crescente (A4), frequência 100 Hz (B4).

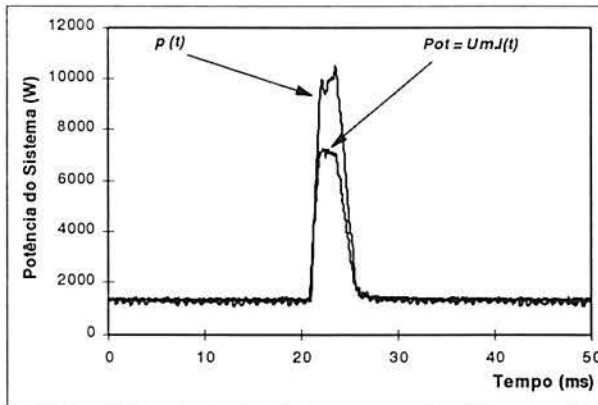


Fig.83: Comparação entre a potência instantânea ($p(t)$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (Pot), forma de onda composta decrescente (A5), frequência 25 Hz (B1).

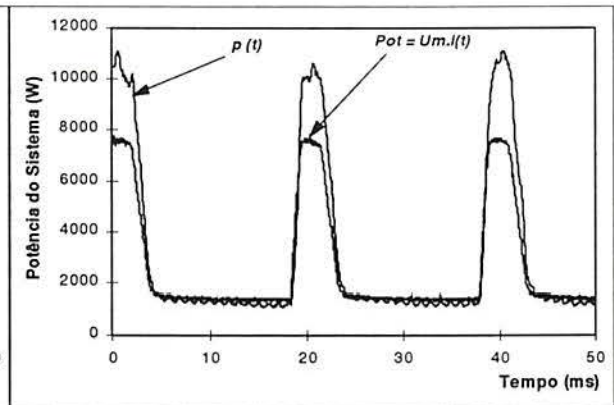


Fig.84: Comparação entre a potência instantânea ($p(t)$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (Pot), forma de onda composta decrescente (A5), frequência 50 Hz (B2).

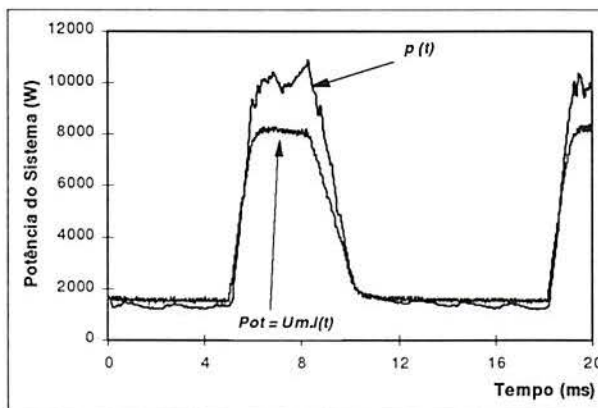


Fig.85: Comparação entre a potência instantânea ($p(t)$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (Pot), forma de onda composta decrescente (A5), frequência 75 Hz (B3).

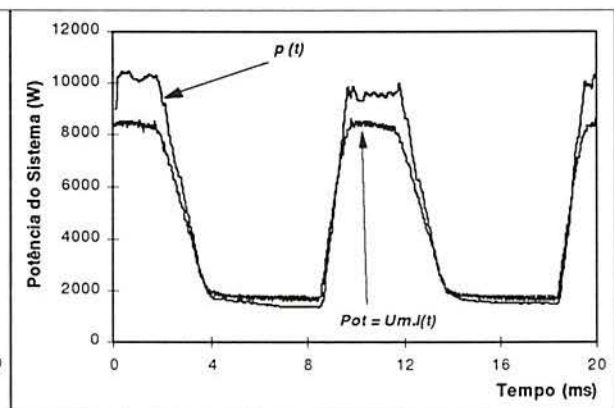


Fig.86: Comparação entre a potência instantânea ($p(t)$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (Pot), forma de onda composta decrescente (A5), frequência 100 Hz (B4).

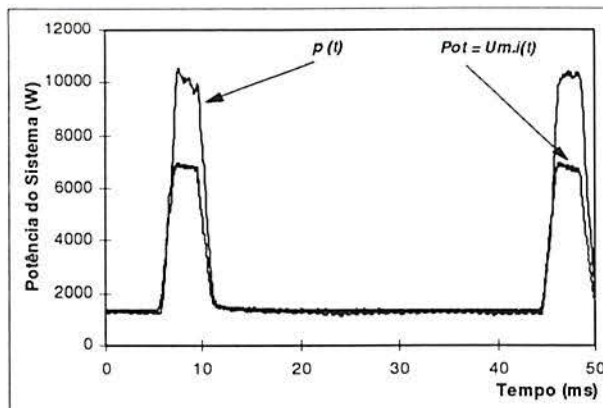


Fig.87: Comparação entre a potência instantânea ($p(t)$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (Pot), forma de onda combinada (A6), frequência 25 Hz (B1).

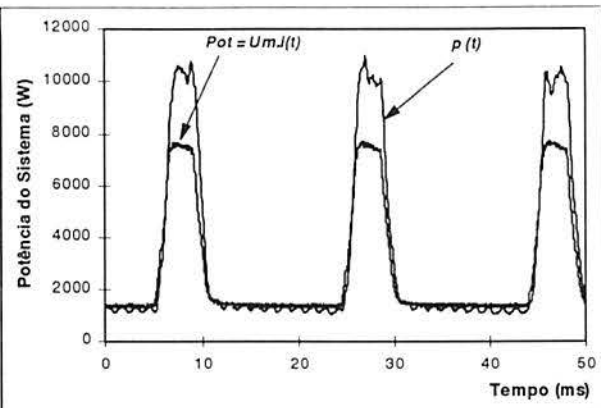


Fig.88: Comparação entre a potência instantânea ($p(t)$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (Pot), forma de onda combinada (A6), frequência 50 Hz (B2).

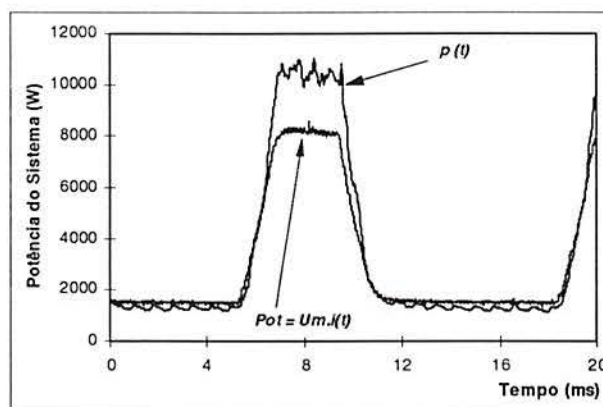


Fig.89: Comparação entre a potência instantânea ($p(t)$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (Pot), forma de onda combinada (A6), frequência 75 Hz (B3).

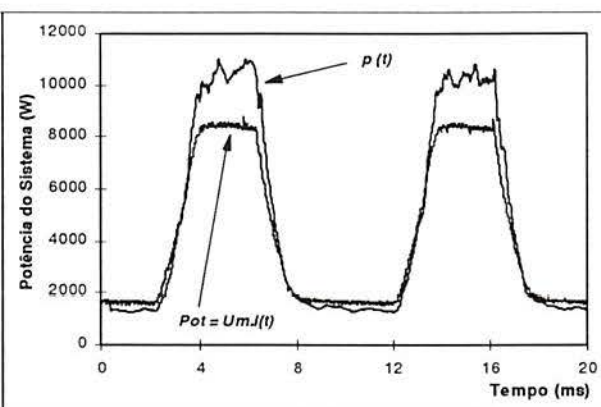


Fig.90: Comparação entre a potência instantânea ($p(t)$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (Pot), forma de onda combinada (A6), frequência 100 Hz (B4).

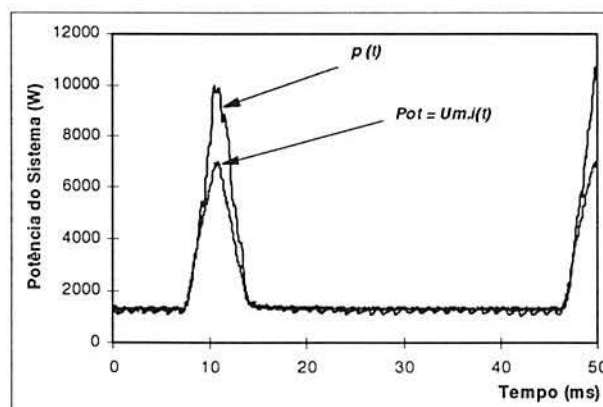


Fig.91: Comparação entre a potência instantânea ($p(t)$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (Pot), forma de onda triangular (A7), frequência 25 Hz (B1).

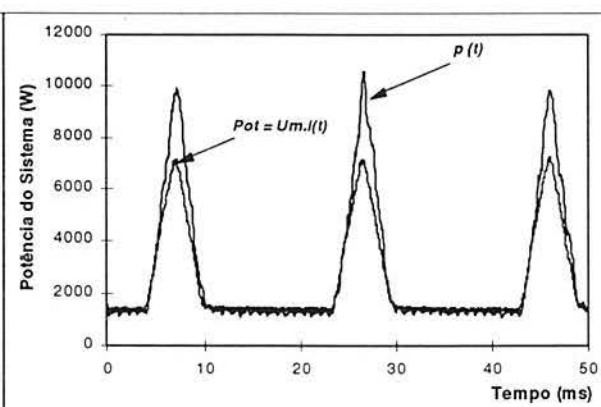


Fig.92: Comparação entre a potência instantânea ($p(t)$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (Pot), forma de onda triangular (A7), frequência 50 Hz (B2).

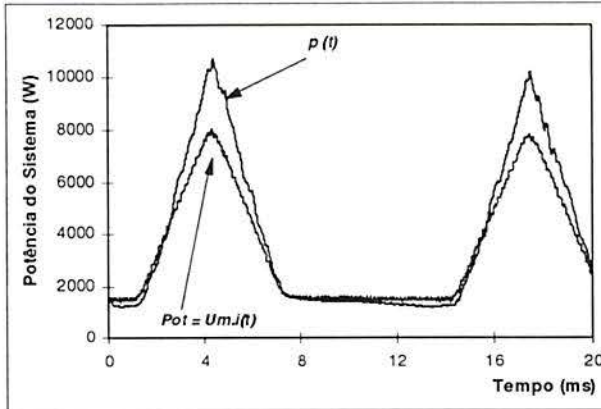


Fig.93: Comparação entre a potência instantânea ($p(t)$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (Pot), forma de onda triangular (A7), frequência 75 Hz (B3).

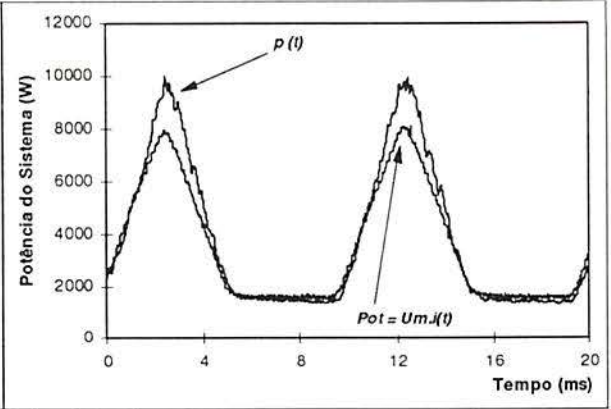


Fig.94: Comparação entre a potência instantânea ($p(t)$) e a potência do produto da corrente instantânea pela tensão média do processo (Pot), forma de onda triangular (A7), frequência 100 Hz (B4).

12.1.3.- Potência do Sistema

A potência média do sistema (P_m) difere significativamente da potência determinada como produto da corrente média de soldagem e tensão média do processo ($POT = U_m \cdot I_m$), como mostra a Fig.95. A maioria das fontes de soldagem, do processo MIG/MAG pulsado, fornecem os valores médios da tensão do processo e da corrente média de soldagem. Então, uma aproximação da potência do sistema pode ser obtida utilizando-se o produto da corrente média de soldagem pela tensão média do processo ($POT = U_m \cdot I_m$).

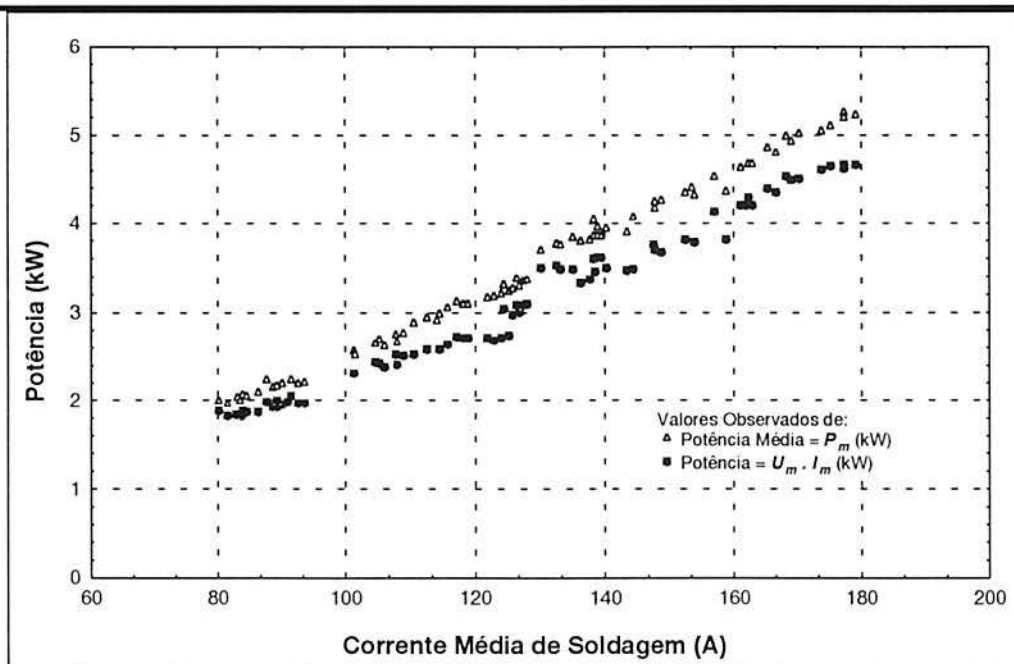


Fig.95: Valores observados da potência média (P_m) e da potência determinada como produto da corrente média de soldagem e tensão média do processo (POT) em função da corrente média de soldagem, cordão de solda “bead-on-plate”, posição plana.

12.2.- Cordões de Solda em Filete

12.2.1.- Forma de Onda Retangular (A1)

12.2.1.1.- Correntes Média e de Pico de Soldagem

As amostras dos sinais da corrente de soldagem, obtidas do sensor Hall, e da tensão do processo foram adquiridas em um total de quatro para cada forma e frequência da onda de tensão de controle utilizada na execução dos cordões de solda em filete, posição plana. Estas aquisições foram realizadas em diferentes tempos durante a soldagem.

Os valores da velocidade de alimentação do arame não foram estritamente constante em função do tempo, durante a realização dos cordões de solda, apresentando pequenas oscilações ($\pm 0,0127$ m/min). Isso pode ser devido à característica do sistema de alimentação de arame da fonte de soldagem, ou à interação da corrente de soldagem com seu próprio campo magnético.

Na Fig.96, são plotados os valores médios da corrente média de soldagem (I_m) em função da frequência da onda (F) e tensão de controle de pico (V_{R-p}) da fonte, onde para um incremento na F corresponde um aumento no valor da I_m . Por exemplo, para $V_{R-p} = 7,5$ V, $F = 100$ Hz a $I_m \approx 130$ A, $F = 200$ Hz a $I_m \approx 209$ A, $F = 300$ Hz a $I_m \approx 290$ A. O mesmo efeito exerce a tensão de controle de pico (V_{R-p}) para uma mesma frequência, incrementando a V_{R-p} obtém-se um aumento no valor da corrente média de soldagem, por exemplo, para $F = 100$ Hz, $V_{R-p} = 7,5$ V a $I_m \approx 130$ A; $V_{R-p} = 8,0$ V a $I_m \approx 140$ A; $V_{R-p} = 8,5$ V a $I_m \approx 146$ A. Para $F = 300$ Hz, $V_{R-p} = 7,5$ V a $I_m \approx 290$ A; $V_{R-p} = 8,0$ V a $I_m \approx 305$ A; $V_{R-p} = 8,5$ V a $I_m \approx 326$ A.

Na Fig.97, são plotados os valores observados das correntes média (I_m) e de pico (I_p) de soldagem em função da frequência da onda (F), tensão de controle de pico (V_{R-p}) da fonte de 7,5 V. O valor da I_p é de aproximadamente igual a 420 A, e o efeito da frequência da onda não é significativo. O intervalo da corrente média de soldagem (I_m) é de 130 a 290 A.

Na Fig.98, são plotados os valores observados das correntes média (I_m) e de pico (I_p) de soldagem em função da frequência da onda (F), tensão de controle de pico (V_{R-p}) da fonte de 8,0 V. O valor da I_p é de aproximadamente igual a 450 A, e o efeito da frequência da onda não é significativo. O intervalo da corrente média de soldagem (I_m) é de 140 a 305 A.

Na Fig.99, são plotados os valores observados das correntes média (I_m) e de pico (I_p) de soldagem em função da frequência da onda (F), tensão de controle de pico (V_{R-p}) da fonte de 8,5 V. O valor da I_p é de aproximadamente igual a 460 A, e o efeito da frequência da onda não é significativo. O intervalo da corrente média de soldagem (I_m) é de 146 a 326 A.

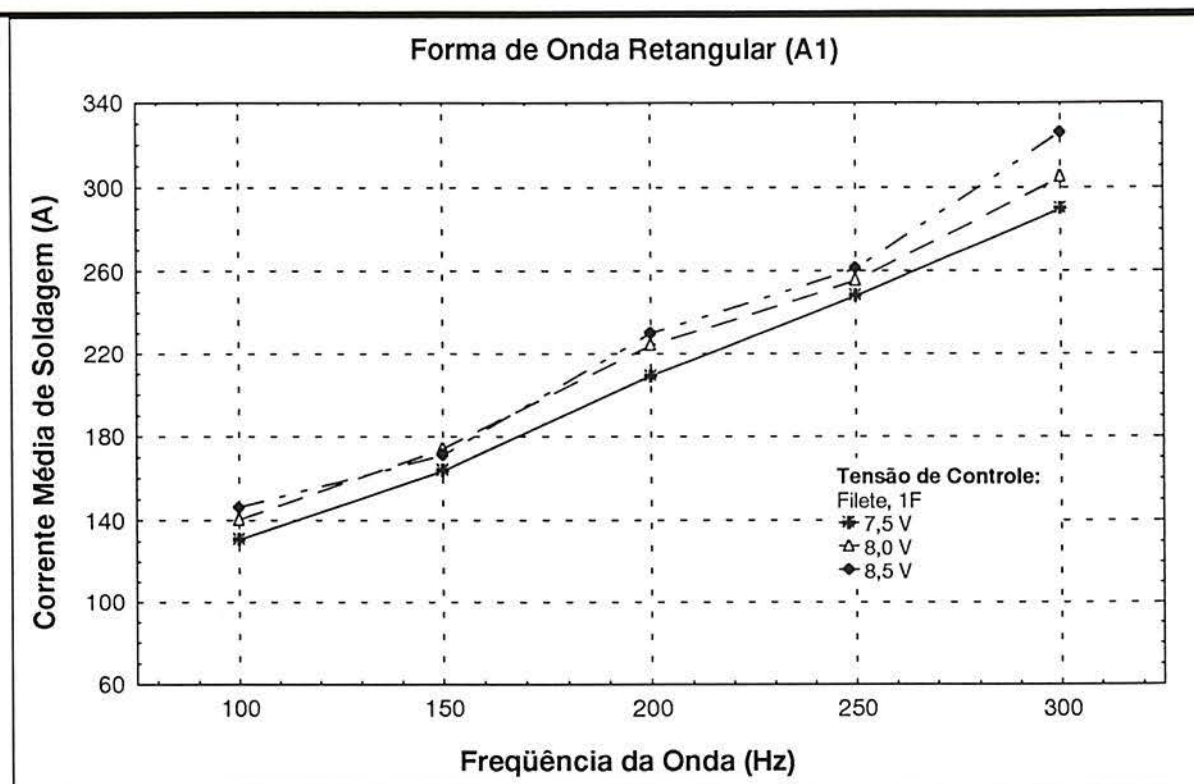


Fig.96: Valores médios observados da corrente média de soldagem em função da frequência da onda e da tensão de controle de pico da fonte, cordão de solda em filete, 1F.

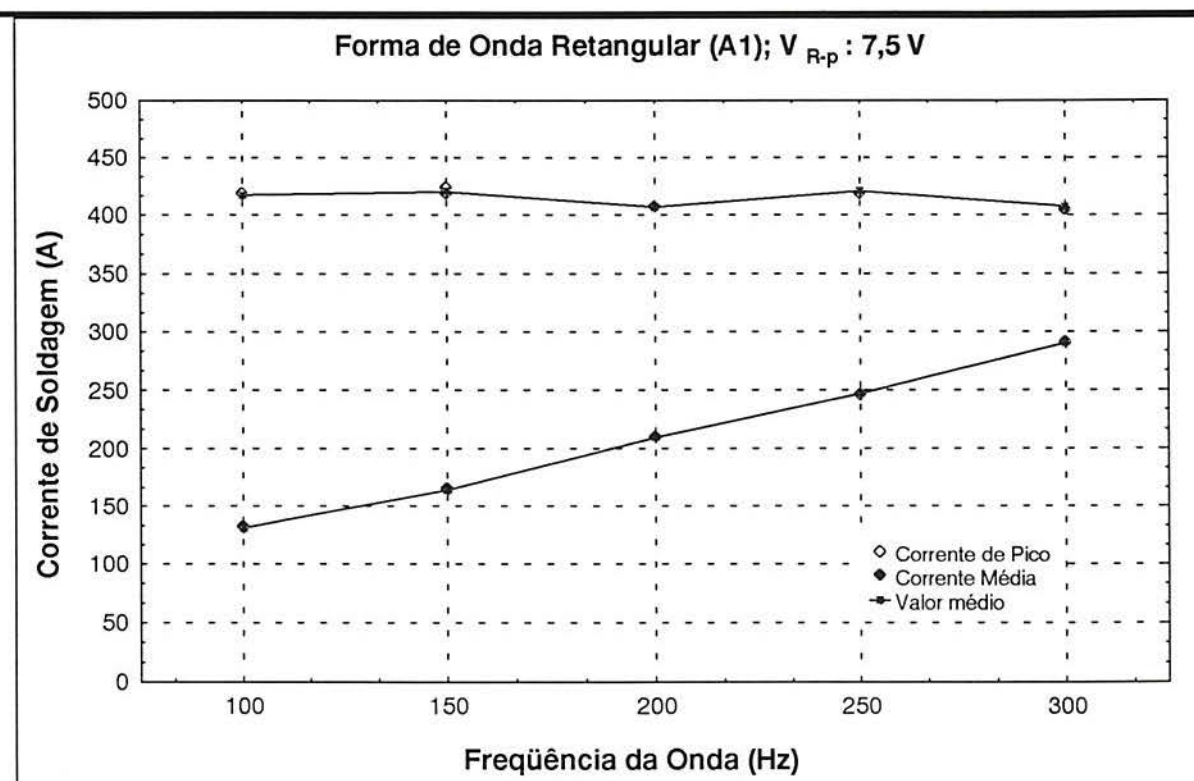


Fig.97: Valores observados das correntes média e pico de soldagem em função da frequência da onda, tensão de controle de pico da fonte (V_{R-p}) 7,5 V, cordão de solda em filete, 1F.

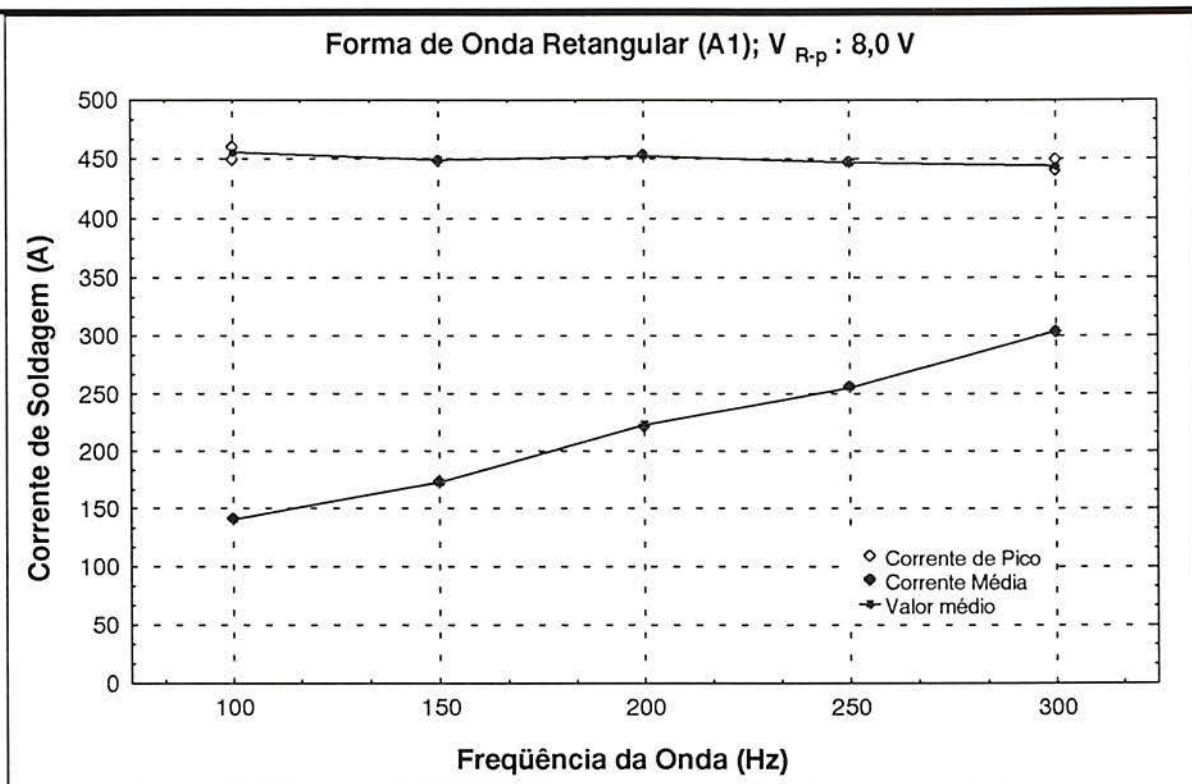


Fig.98: Valores observados das correntes média e pico de soldagem em função da frequência da onda, tensão de controle de pico da fonte (V_{R-p}) 8,0 V, cordão de solda em filete, 1F.

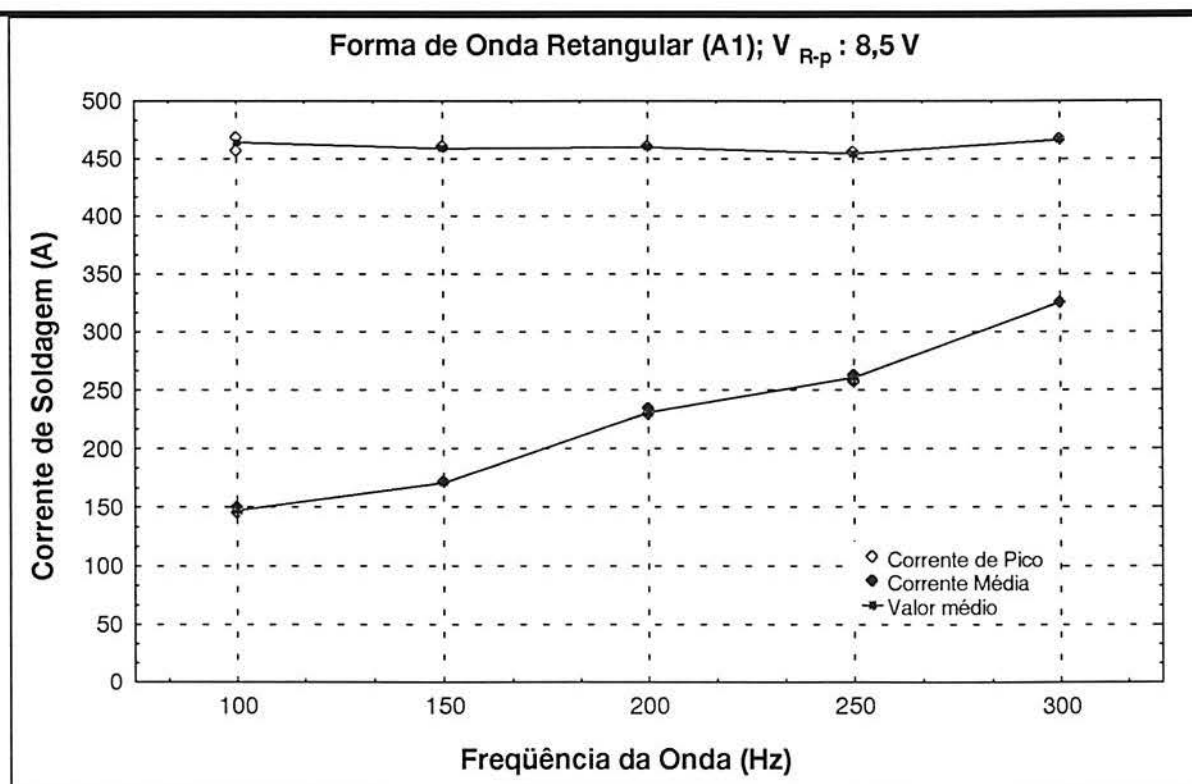


Fig.99: Valores observados das correntes média e pico de soldagem em função da frequência da onda, tensão de controle de pico da fonte (V_{R-p}) 8,5 V, cordão de solda em filete, 1F.

12.2.1.2.- Oscilogramas da Corrente de Soldagem, Tensão do Processo e Potência

O objetivo é mostrar os formatos dos pulsos obtidos na saída da fonte de soldagem, para cada combinação de tratamento e forma de onda de tensão de controle retangular (A1), referente aos valores mostrados na Tabela 8 (parte experimental).

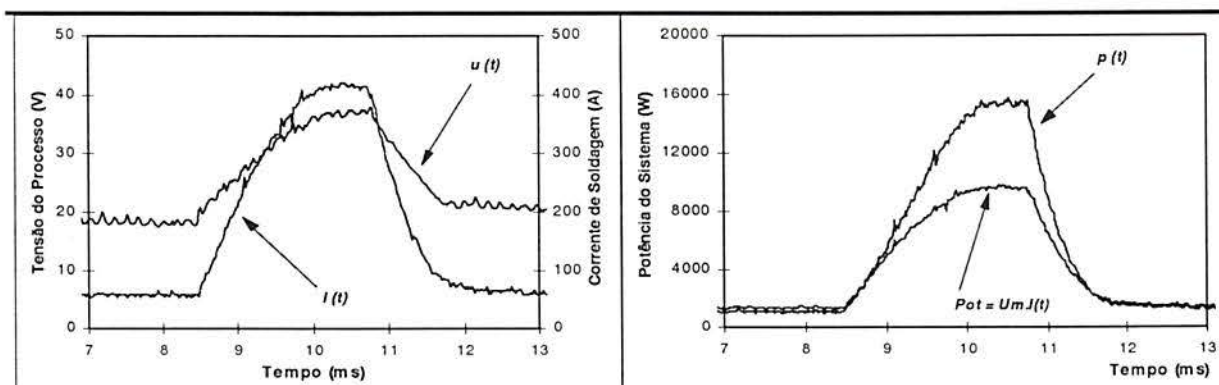


Fig.100: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 100$ Hz, tensão de controle de pico ($V_{R-p} = 7,5$ V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).

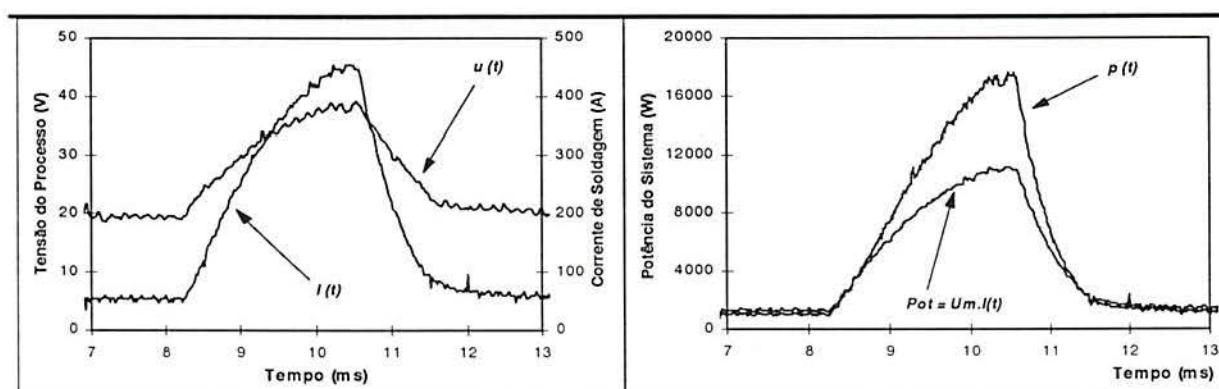


Fig.101: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 100$ Hz, tensão de controle de pico ($V_{R-p} = 8,0$ V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).

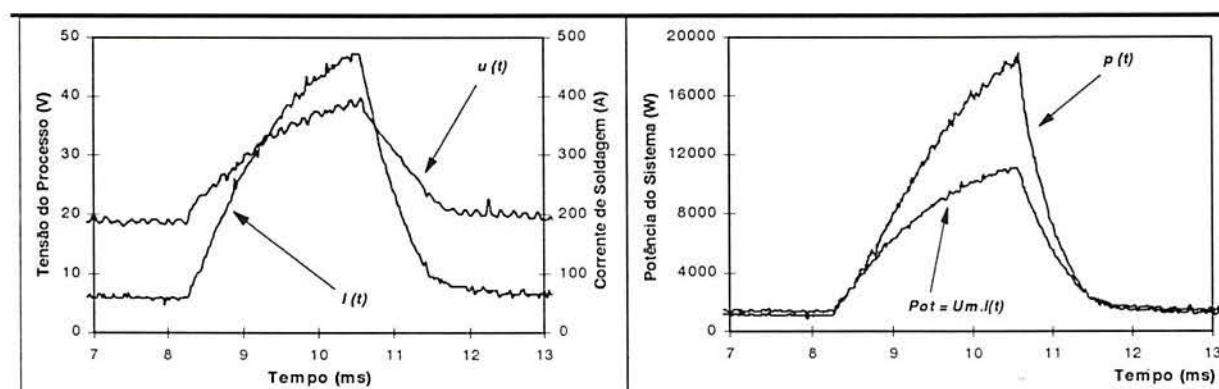


Fig.102: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 100$ Hz, tensão de controle de pico ($V_{R-p} = 8,5$ V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).

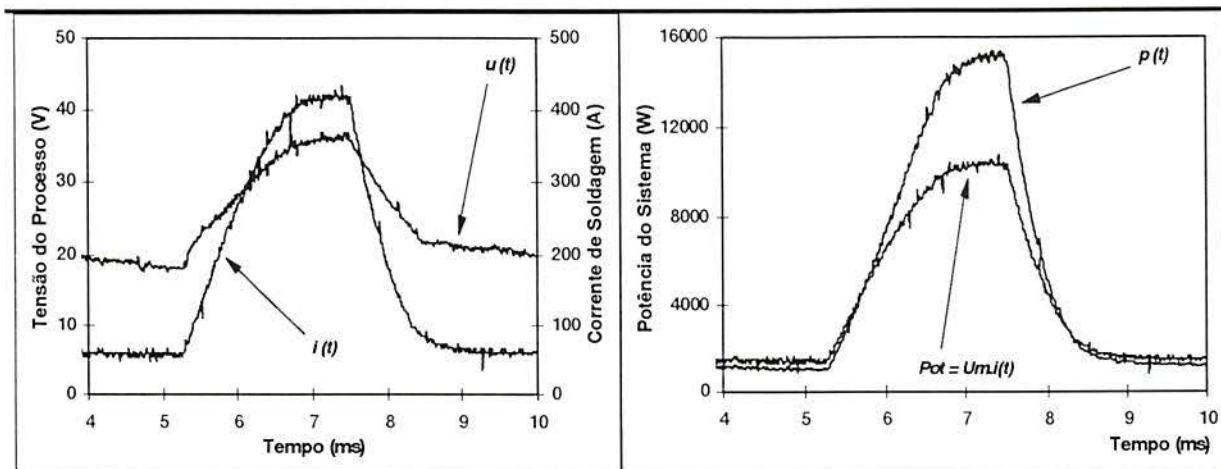


Fig.103: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 150$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 7,5 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).

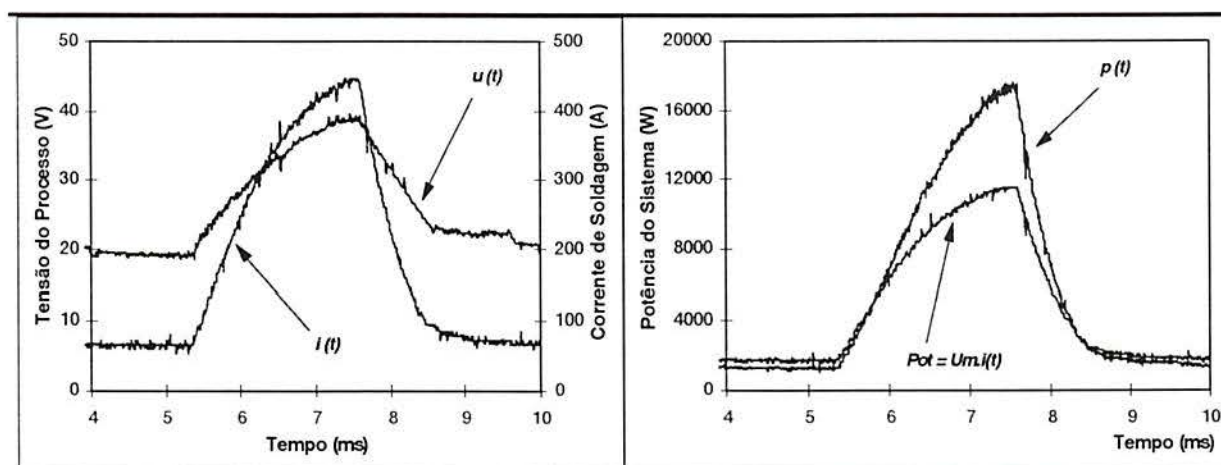


Fig.104: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 150$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,0 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).

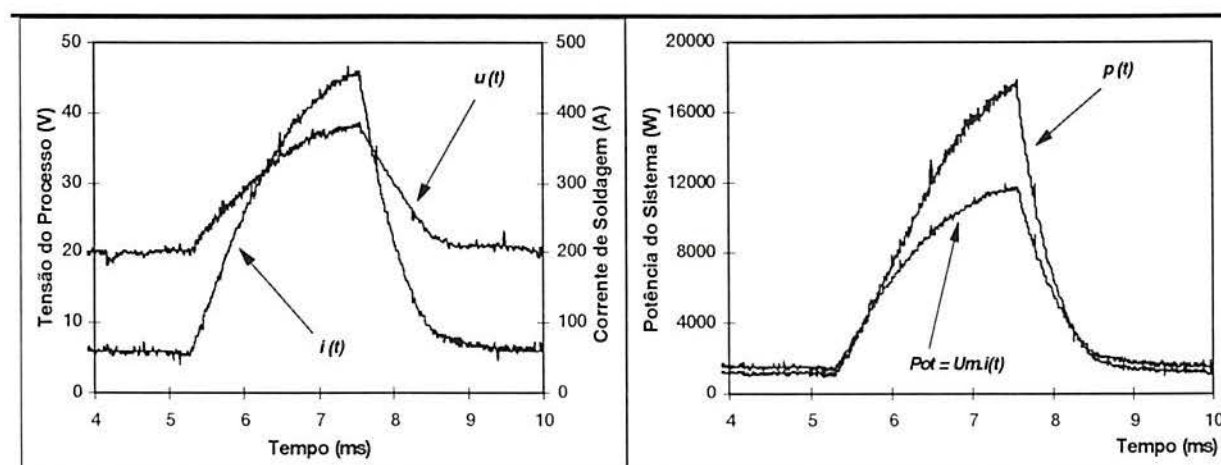


Fig.105: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 150$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).

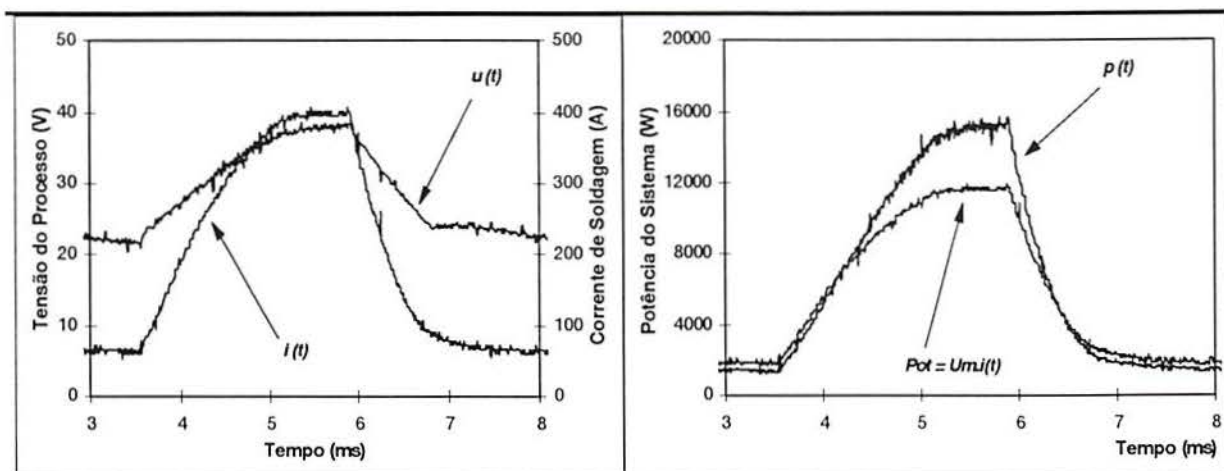


Fig.106: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 200$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 7,5 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).

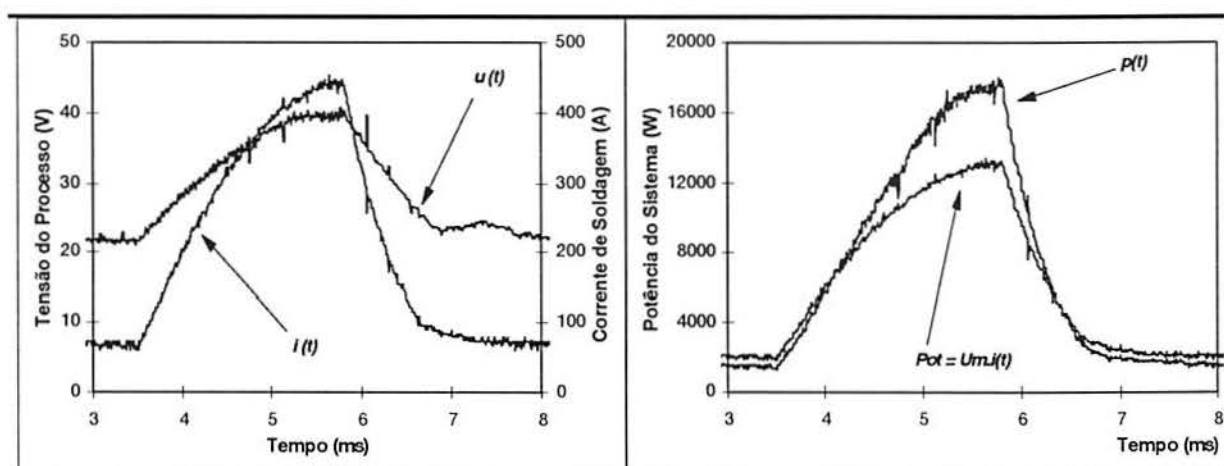


Fig.107: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 200$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,0 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).

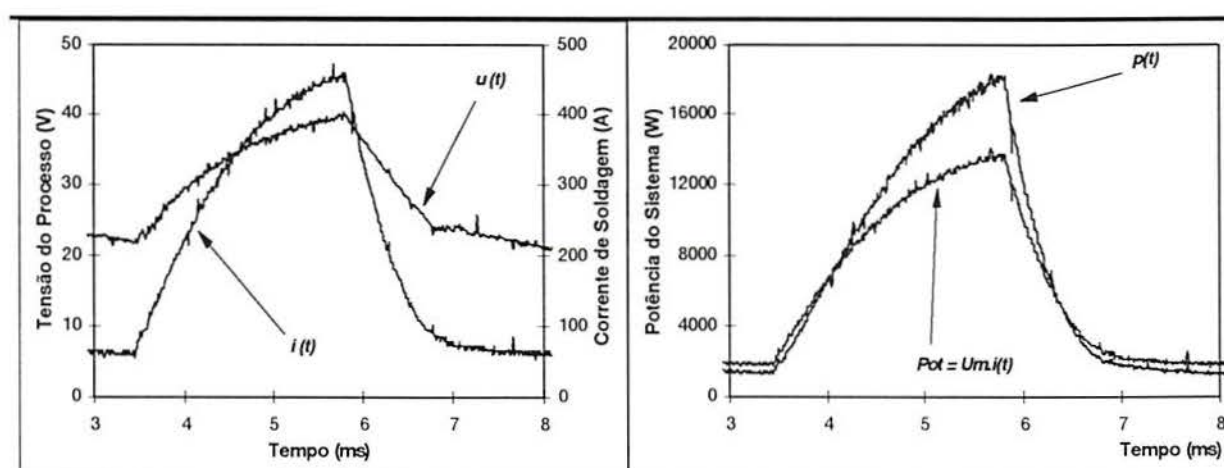


Fig.108: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 200$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).

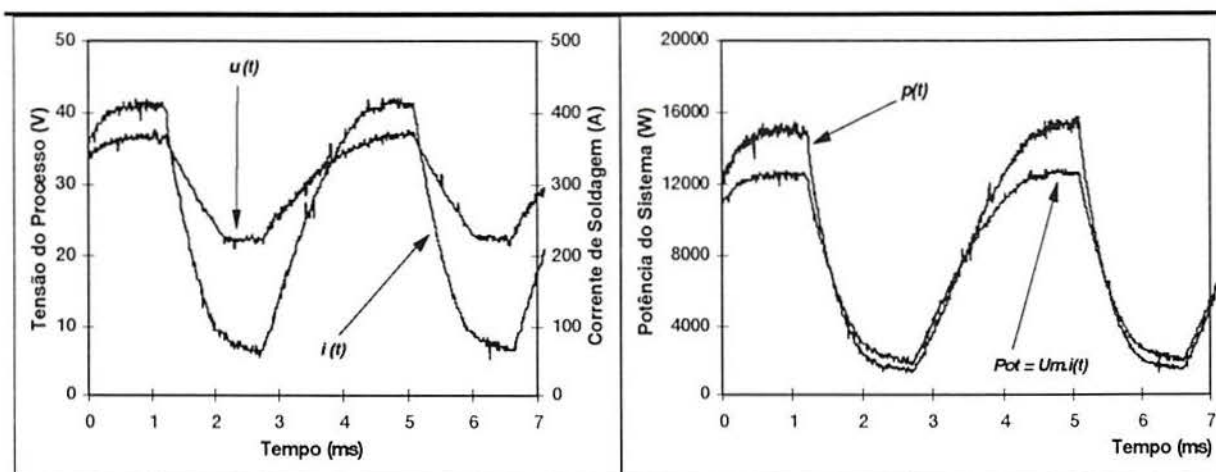


Fig.109: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 250$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 7,5 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).

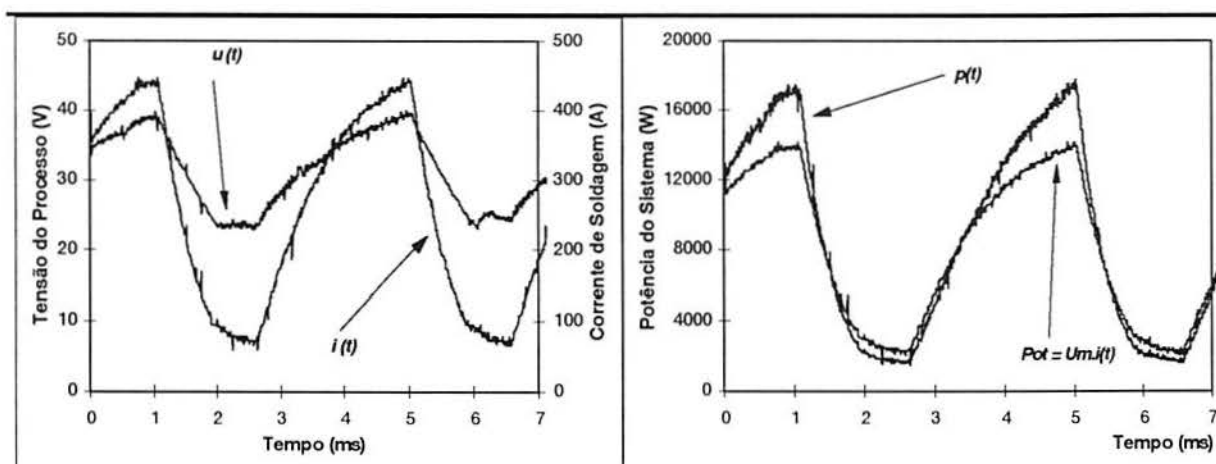


Fig.110: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 250$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,0 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).

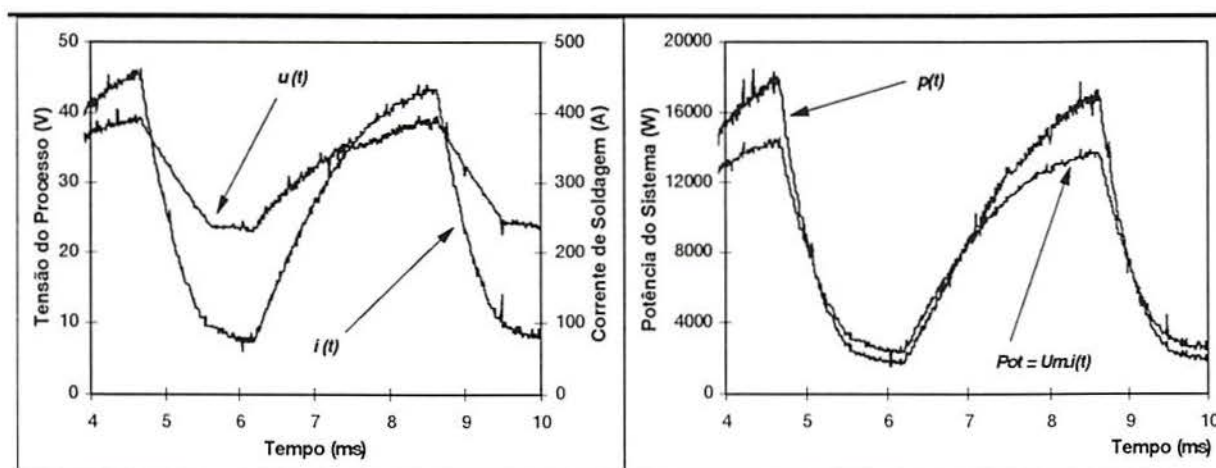


Fig.111: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 250$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).

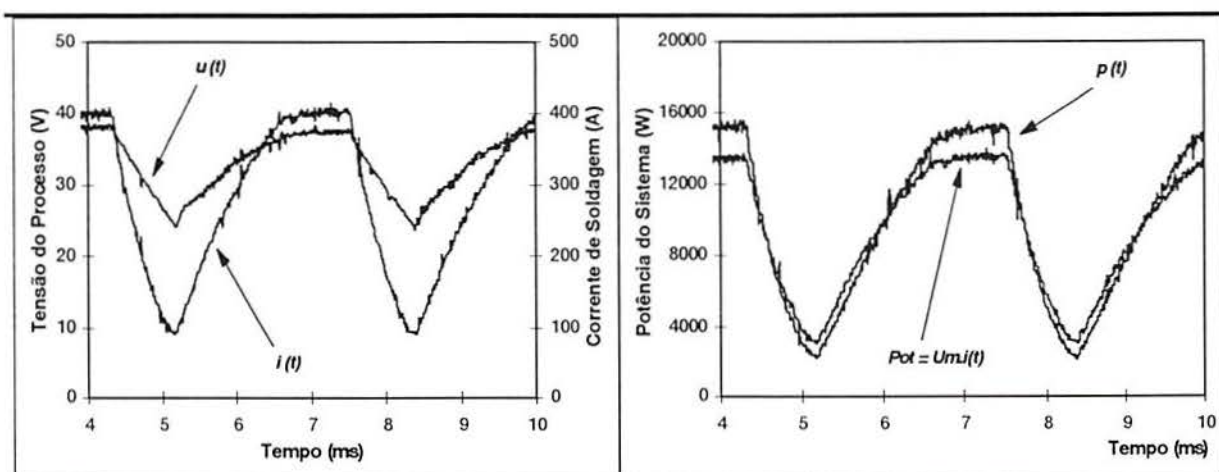


Fig.112: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 300$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 7,5 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).

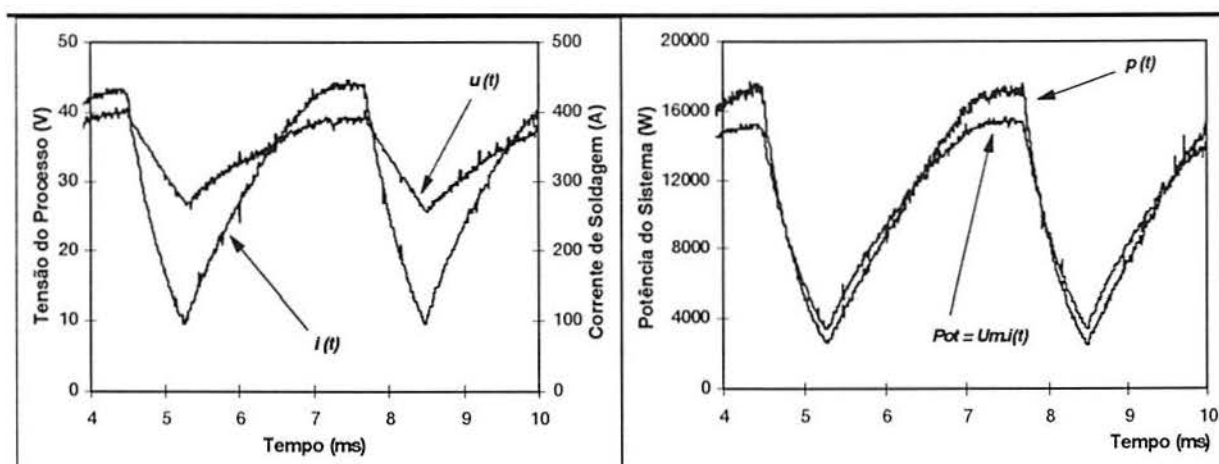


Fig.113: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 300$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,0 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).

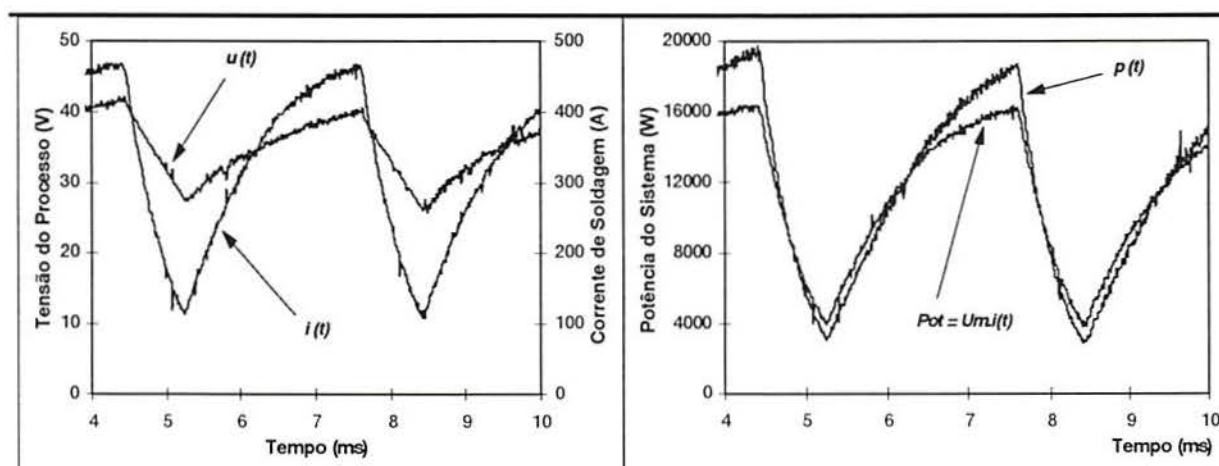


Fig.114: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 300$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).

Os oscilogramas obtidos da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema mostram que para uma forma de onda retangular da tensão de controle (sinal de entrada, $V_{R(t)}$), a função de resposta da fonte de soldagem tem comportamento exponencial, como mostra as Figs.100-114.

12.2.1.3.- Função Exponencial

Apesar de não ter sido utilizada a forma de onda exponencial da tensão controle da fonte ($V_{R(t)}$). Foi observada na corrente de soldagem ($i_{(t)}$), como mostra a Fig.115, e na potência do sistema ($p_{(t)}$).

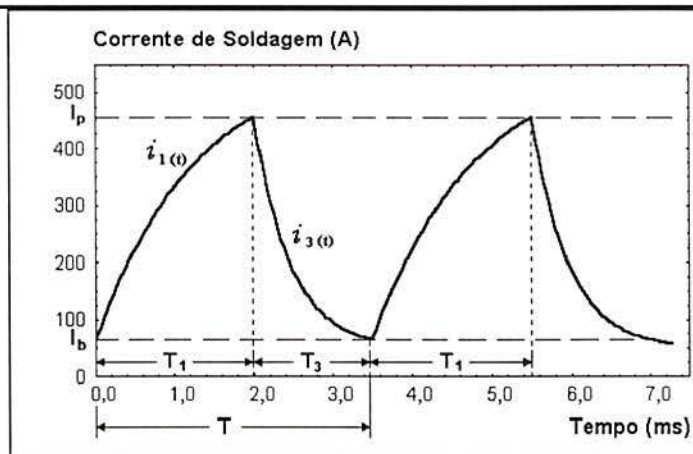


Fig.115: Forma de onda exponencial da corrente de soldagem.

A corrente de soldagem com a forma de onda exponencial é analisada a seguir:

.- O crescimento exponencial da corrente de soldagem a partir do valor de base até o valor de pico, $i_{1(t)}$, tem a seguinte expressão:

$$i_{1(t)} = I_b + (\hat{I}_p - I_b) \cdot (1 - e^{-\lambda_1 t}) \quad (A) \quad t_0 + (i - 1) \cdot T < t \leq t_0 + (i) \cdot T + T_1 \quad [12.1]$$

Onde λ_1 é a constante de tempo relacionado à corrente de soldagem, $i_{1(t)}$.

O valor da corrente de pico (I_p , quando $t = T_1$) pode ser determinado mediante a seguinte relação:

$$I_p = i_{1(T_1)} = I_b + (\hat{I}_p - I_b) \cdot (1 - e^{-\lambda_1 T_1}) \quad (A) \quad [12.1a]$$

.- O decréscimo exponencial da corrente de soldagem desde o valor de pico até o de base, $i_{3(t)}$, pode ser representado pela seguinte expressão:

$$i_{3(t)} = \hat{I}_p + (i_{1(T_1)} - \hat{I}_p) \cdot e^{-\lambda_3(t - T_1)} \quad (A) \quad t_0 + (i - 1) \cdot T + T_1 < t \leq t_0 + (i) \cdot T + T_1 + T_3 \quad [12.2]$$

O valor da corrente de base (I_b , quando $t = T_3 = T - T_1$) pode ser determinado mediante a seguinte relação:

$$I_b = i_{3(T_3)} = \hat{I}_b + (i_{I(T_1)} - \hat{I}_b) \cdot e^{-\lambda_3(T_3)} \quad (A) \quad [12.2a]$$

Onde λ_3 é a constante de tempo, da corrente $i_{3(t)}$, e seu valor pode ser igual ou diferente à λ_I . As taxas de crescimento e de decréscimo, da função exponencial da corrente ($i_{(t)}$), variam em função do tempo, portanto não é constante, como pode ser observado na Fig.115.

As constantes λ_I e λ_3 estão relacionadas, entre outros, com:

- .- Projeto eletro/eletrônico da fonte;
- .- Características dos componentes elétrico/eletrônicos utilizados;
- .- Os valores dos parâmetros da onda;
- .- Tipo, diâmetro e comprimento dos cabos que ligam da fonte ao metal base e à tocha.

A corrente média se obtém integrando a corrente de soldagem ($i_{(t)}$), no período T , em função do tempo:

$$I_m = \frac{I}{(i) \cdot T} \cdot \int_{t_0+(i-1)T}^{t_0+(i)T} i_{(t)} \cdot dt = \frac{I}{(i) \cdot T} \cdot \int_{t_0+(i-1)T}^{t_0+(i)T} (i_{I(t)} + i_{3(t)}) \cdot dt \quad (A) \quad [12.3]$$

Substituindo as equações [12.1] e [12.2] na equação [12.3] e integrando-as no período T ($i = 1$), obtém-se a expressão da corrente média de soldagem:

$$I_m = \frac{I_b \cdot T_1}{T} + \frac{(\hat{I}_p - I_b)}{T} \cdot \frac{(T_1 \cdot \lambda_I + e^{-\lambda_I T_1} - I)}{\lambda_I} + \frac{\hat{I}_b \cdot T_3}{T} + \frac{(I_p - \hat{I}_b)}{T} \cdot \left(\frac{1 - e^{-\lambda_3 T_3}}{\lambda_3} \right) \quad (A) \quad [12.4]$$

Onde:

\hat{I}_p = Valor final da corrente de pico para um tempo $t \gg (I/\lambda_I)$, (A);

\hat{I}_b = Valor final da corrente de base para um tempo $t \gg (I/\lambda_3)$, (A);

λ_I e λ_3 = Constante de tempo das correntes $i_{I(t)}$ e $i_{3(t)}$, respectivamente, (1/ms);

I_m = Corrente média de soldagem, (A);

T_1 ; T_3 e T = Tempos de crescimento, decréscimo e período, respectivamente, (ms).

Fazendo-se a analogia da potência do sistema à corrente de soldagem, obtém-se as expressões das potências $p_{I(t)}$, $p_{3(t)}$ e da média do sistema (P_m), que são:

$$p_{I(t)} = P_b + (\hat{P}_p - P_b) \cdot (1 - e^{-\lambda_{pI} t}) \quad (A) \quad t_0 + (i-1) \cdot T < t \leq t_0 + (i) \cdot T + T_1 \quad [12.5]$$

$$p_{3(t)} = \hat{P}_b + (p_{I(T_1)} - \hat{P}_b) \cdot e^{-\lambda_{p3}(t-T_1)} \quad (A) \quad t_0 + (i-1) \cdot T + T_1 < t \leq t_0 + (i) \cdot T + T_1 + T_3 \quad [12.6]$$

$$P_m = \frac{P_b \cdot T_1}{T} + \frac{(\hat{P}_p - P_b)}{T} \cdot \frac{(T_1 \cdot \lambda_{pI} + e^{-\lambda_{pI} T_1} - I)}{\lambda_{pI}} + \frac{\hat{P}_b \cdot T_3}{T} + \frac{(P_p - \hat{P}_b)}{T} \cdot \left(\frac{1 - e^{-\lambda_{p3} T_3}}{\lambda_{p3}} \right) \quad (W) \quad [12.7]$$

Onde:

\hat{P}_p = Valor final da potência de pico para um tempo $t \gg (I/\lambda_{pI})$, (W);

\hat{P}_b = Valor final da potência de base para um tempo $t \gg (I/\lambda_{p3})$, (W);

λ_{p1} e λ_{p3} = Constante de tempo das potências $p_{I(t)}$ e $p_{3(t)}$, respectivamente, (1/ms);

P_m = Potência média do sistema, (W);

T_I ; T_3 e T = Tempos de crescimento, decréscimo e período, respectivamente, (ms).

Os valores das constantes de tempo λ_I e λ_3 , e os termos $(\hat{I}_p - I_b)$, $(I_p - \hat{I}_b)$ e \hat{I}_b podem ser obtidos empiricamente, para cada combinação de tratamento, utilizando-se os valores registrados da corrente (tensão ou potência) em função do tempo.

A Fig.116 mostra os valores observados e a função das equações das correntes de crescimento [12.8] e decréscimo [12.9], para a forma de onda retangular, $F = 300$ Hz, $V_{R-p} = 8,5$ V ($I_p \approx 466$ A), junta filete, posição plana, a seguir:

$$i_{I(t)} = 100,0 + (419,7) \cdot (1 - e^{-0,962126 \cdot t}) \quad (\text{A}) \quad 0 < t \text{ (ms)} \leq 2,375 \quad [12.8]$$

$$i_{3(t)} = -33,3 + (511,8) \cdot e^{-1,51921(t - 2,375366)} \quad (\text{A}) \quad 2,375 < t \text{ (ms)} \leq 3,216 \quad [12.9]$$

Substituindo os valores das equações [12.8] e [12.9] na equação [12.4] é possível calcular o valor da corrente média de soldagem, obtendo-se $I_m = 328$ A, enquanto que o valor determinado por integração numérica é de 326 A.

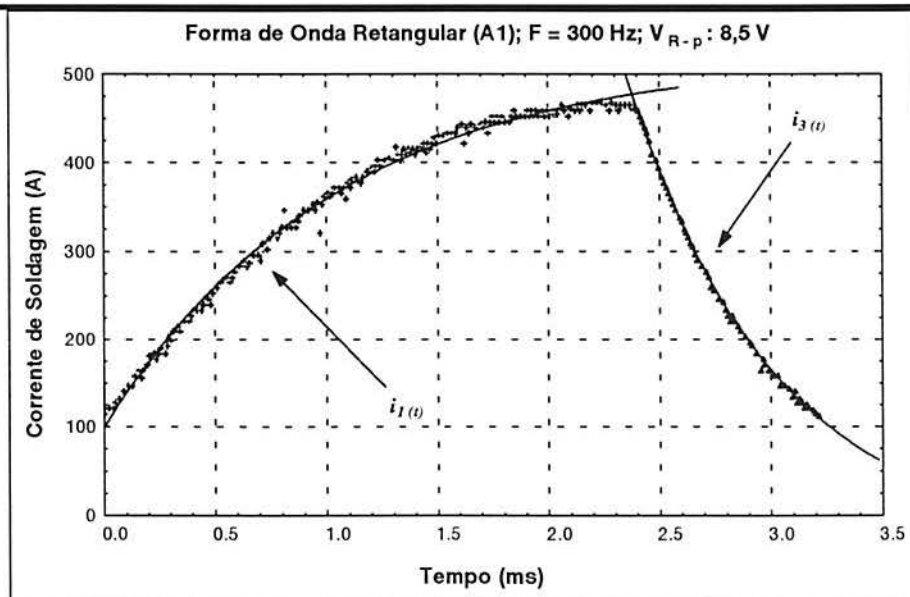


Fig.116: Função exponencial da corrente de soldagem, $F = 300$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).

A Fig.117 mostra os valores observados e a função das equações das potências de crescimento [12.10] e decréscimo [12.11], para a forma de onda retangular, $F = 300$ Hz, $V_{R-p} = 8,5$ V, junta filete, posição plana, a seguir:

$$p_{1(t)} = 2.055,3 + (22.898,5) \cdot (1 - e^{-0,646200 \cdot t}) \quad (\text{A}) \quad 0 < t \text{ (ms)} \leq 2,375 \quad [12.10]$$

$$p_{3(t)} = -1.104,9 + (20.979,4) \cdot e^{-1,94588(t - 2,375367)} \quad (\text{A}) \quad 2,375 < t \text{ (ms)} \leq 3,216 \quad [12.11]$$

Substituindo os valores das equações [12.11] e [12.10] na equação [12.7] é possível calcular o valor da potência média do sistema, obtendo-se $P_m = 12.197 \text{ W}$, enquanto que o valor determinado por integração numérica é de 11.863 W .

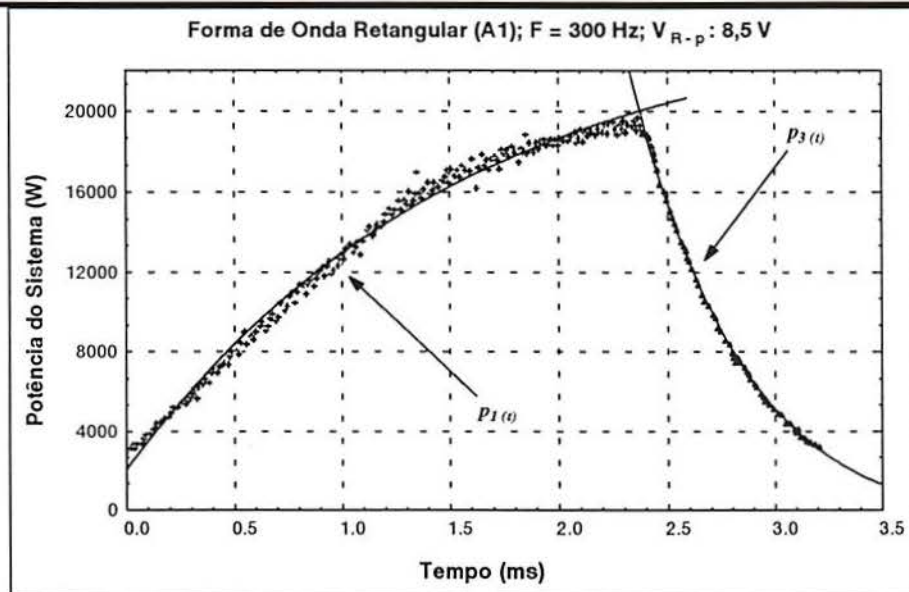


Fig.117: Função exponencial da potência do sistema, $F = 300 \text{ Hz}$, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = $8,5 \text{ V}$, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).

Na Tabela 12 são mostrados os valores das constantes de tempo, corrente média de soldagem e potência média do sistema, para a forma de onda retangular e frequência da onda 300 Hz , tensão de pico $8,5 \text{ V}$ ($I_p \approx 466 \text{ A}$) e $8,0 \text{ V}$ ($I_p \approx 450 \text{ A}$), junta filete, 1F. Da Tabela 12 os valores as constantes de tempo relacionados à corrente e à potência apresentam diferença entre si. Se a corrente de base (I_b) é constante, para um aumento na corrente de pico (I_p) corresponde um aumento no valor de excesso ($I_e = I_p - I_b$), que por sua vez afeta os valores das constantes λ_1 e λ_3 . Portanto, os valores das constantes de tempo λ_1 e λ_3 , e os termos $(\hat{I}_p - I_b)$, $(I_p - \hat{I}_b)$ e \hat{I}_b podem ser obtidos empiricamente, e são fortemente influenciado pelos valores dos parâmetros, e devem ser determinados para cada combinação.

Tab.12: Valores das constantes de tempo, corrente média de soldagem e potência média do sistema, para a forma de onda retangular e frequência da onda 300 Hz , junta filete, 1F.

$V_{R-p} \text{ (V)}$	$\lambda_1 \text{ (1/ms)}$	$\lambda_3 \text{ (1/ms)}$	$I_m \text{ (A)}$	$\lambda_{p1} \text{ (1/ms)}$	$\lambda_{p3} \text{ (1/ms)}$	$P_m \text{ (W)}$
8,5	0,962126	1,51921	328	0,646200	1,94588	12.197
8,0	0,822464	1,45328	303	0,534197	1,95254	10.778

12.2.1.4.- Função Exponencial Combinada

A função exponencial combinada foi observada na corrente de soldagem ($i_{(t)}$), como mostra a Fig.118, e na potência do sistema ($p_{(t)}$) (vide Figs.66a, 100, 103, 106, 109 e 112).

A corrente de soldagem com a forma de onda exponencial combinada é analisada a seguir:

.- O crescimento exponencial da corrente de soldagem a partir do valor de base até o valor de pico, $i_{1(t)}$, pode ser obtido da equação [12.1].

.- O valor da corrente de pico ($I_p = i_{2(t)}$), que atua durante o tempo T_2 é aproximadamente constante, pode ser obtido mediante a seguinte relação:

$$i_{2(t)} = i_{1(T_1)} = I_b + (\hat{I}_p - I_b) \cdot (1 - e^{-\lambda_1 T_1}) \quad (\text{A}) \quad t_0 + (i-1) \cdot T + T_1 < t \leq t_0 + (i) \cdot T + T_1 + T_2 \quad [12.12]$$

.- O decréscimo exponencial da corrente de soldagem desde o valor de pico até o de base, $i_{3(t)}$, pode ser obtido da equação [12.2].

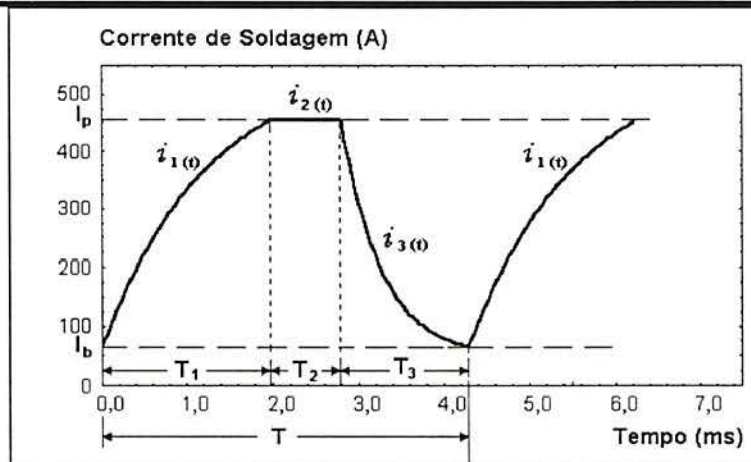


Fig.118: Forma de onda exponencial combinada da corrente de soldagem.

A corrente média se obtém integrando a corrente de soldagem ($i_{(t)}$), no período T , em função do tempo:

$$I_m = \frac{I}{(i) \cdot T} \cdot \int_{t_0 + (i-1)T}^{t_0 + (i)T} i_{(t)} \cdot dt = \frac{I}{(i) \cdot T} \cdot \int_{t_0 + (i-1)T}^{t_0 + (i)T} (i_{1(t)} + i_{2(t)} + i_{3(t)}) \cdot dt \quad (\text{A}) \quad [12.13]$$

Substituindo as equações [12.1] [12.2] e [12.12] na equação [12.13] e integrando-as no período T ($i=1$), obtém-se a expressão da corrente média de soldagem:

$$I_m = \frac{I_b \cdot T_1}{T} + \frac{(\hat{I}_p - I_b)}{T} \cdot \frac{(T_1 \cdot \lambda_1 + e^{-\lambda_1 T_1} - 1)}{\lambda_1} + \frac{I_p \cdot T_2}{T} + \frac{\hat{I}_b \cdot T_3}{T} + \frac{(I_p - \hat{I}_b)}{T} \cdot \left(\frac{1 - e^{-\lambda_3 T_3}}{\lambda_3} \right) \quad (\text{A}) \quad [12.14]$$

Fazendo-se a analogia da potência do sistema à corrente de soldagem, obtém-se a expressão da potência da média do sistema (P_m), que são:

$$P_m = \frac{P_b \cdot T_1}{T} + \frac{(\hat{P}_p - P_b)}{T} \cdot \frac{(T_1 \cdot \lambda_{p1} + e^{-\lambda_{p1} T_1} - 1)}{\lambda_{p1}} + \frac{P_p \cdot T_2}{T} + \frac{\hat{P}_b \cdot T_3}{T} + \frac{(P_p - \hat{P}_b)}{T} \cdot \left(\frac{1 - e^{-\lambda_{p3} T_3}}{\lambda_{p3}} \right) \quad (W) \quad [12.15]$$

A Fig.119 mostra os valores observados e a função das equações das correntes de crescimento [12.16], de pico [12.17] e decréscimo [12.18], para a forma de onda retangular, $F = 200$ Hz, $V_{R-p} = 7,5$ V, junta filete, posição plana, a seguir:

$$i_{1(t)} = 59,6 + (497,5) \cdot (1 - e^{-0,732744t}) \quad (A) \quad 0 < t \text{ (ms)} \leq 1,6129 \quad [12.16]$$

$$i_{2(t)} = 59,6 + 497,5 \cdot (1 - e^{-0,7327 \cdot 1,6129}) = 404,4 \quad (A) \quad 1,6129 < t \text{ (ms)} \leq 2,3167 \quad [12.17]$$

$$i_{3(t)} = 59,6 + (364,5) \cdot e^{-2,44784(t - 2,316755)} \quad (A) \quad 2,3167 < t \text{ (ms)} \leq 4,82 \quad [12.18]$$

Substituindo os valores das equações [12.16] [12.17] e [12.18] na equação [12.14] é possível calcular o valor da corrente média de soldagem, obtendo-se $I_m = 209$ A, enquanto que o valor determinado por integração numérica é de 209 A.

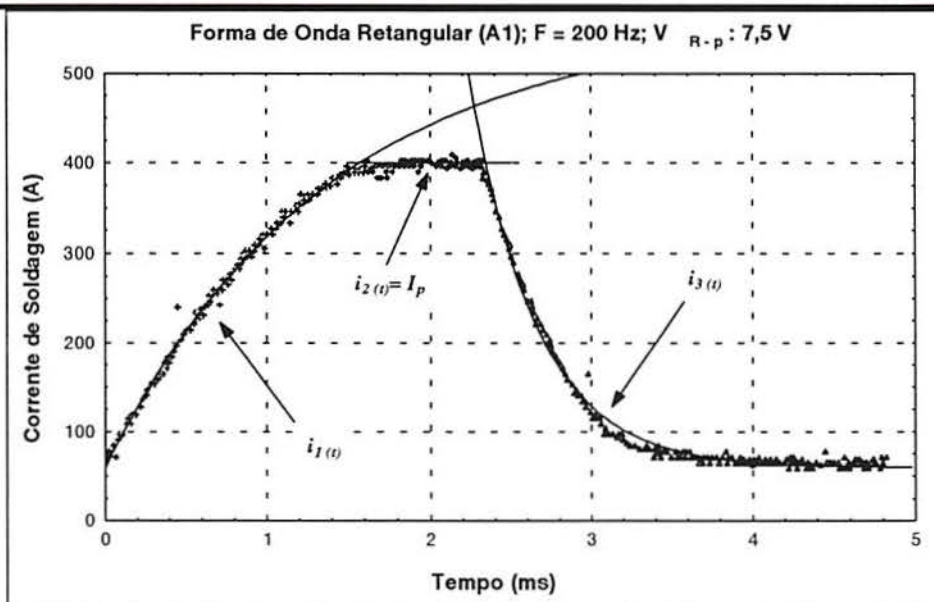


Fig.119: Função exponencial combinada da corrente de soldagem, $F = 200$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 7,5 V, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).

A Fig.120 mostra os valores observados e a função das equações das potências de crescimento [12.19], de pico [12.20] e decréscimo [12.21], para a forma de onda retangular, $F = 200$ Hz, $V_{R-p} = 7,5$ V, junta filete, posição plana, a seguir:

$$p_{1(t)} = 1050,2 + 52.292,5 \cdot (1 - e^{-0,195079 \cdot t}) \quad (A) \quad 0 < t \text{ (ms)} \leq 1,6129 \quad [12.19]$$

$$p_{2(t)} = 15.154 \text{ (W)} \quad 1,6129 < t \text{ (ms)} \leq 2,3167 \quad [12.20]$$

$$p_{3(t)} = 1.250,6 + 14.611,6 \cdot e^{-2,791973 \cdot (t - 2,316755)} \quad (A) \quad 2,3167 < t \text{ (ms)} \leq 4,82 \quad [12.21]$$

Substituindo os valores das equações [12.19] [12.20] e [12.21] na equação [12.15] é possível calcular o valor da corrente média de soldagem, obtendo-se $I_m = 6.785 \text{ W}$, enquanto que o valor determinado por integração numérica é de 6.823 A .

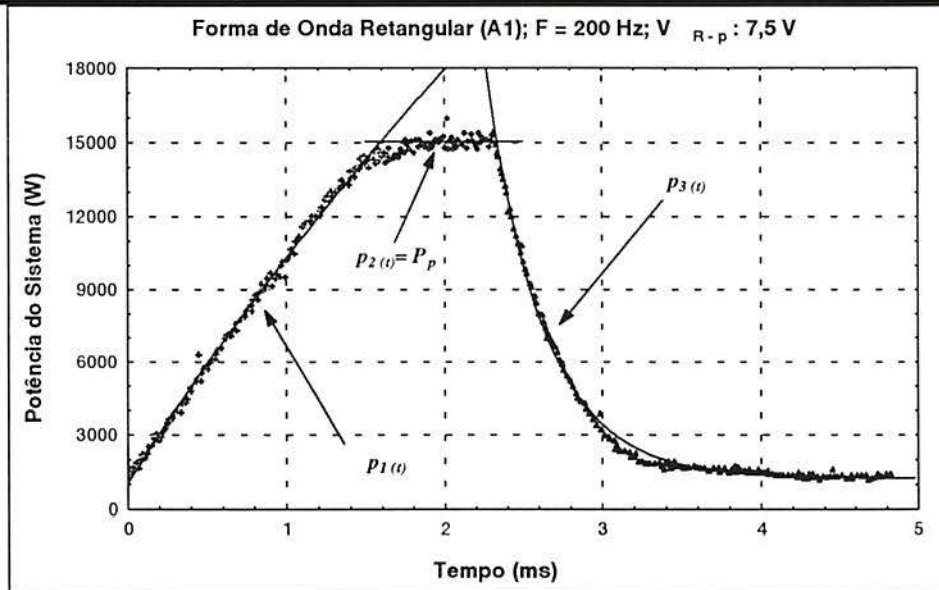


Fig.120: Função exponencial combinada da potência do sistema, $F = 200 \text{ Hz}$, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = $7,5 \text{ V}$, forma de onda retangular, junta filete, posição plana (1F).

O objetivo da análise da função exponencial é obter-se uma expressão genérica, quando utiliza-se a forma de onda retangular (A1) no controle da fonte de soldagem, para determinar a corrente média de soldagem e a potência média do sistema em função dos parâmetros do sinal de saída da fonte. Portanto, não se determinaram os valores das constantes e termos correspondentes para cada combinação de tratamento. Nesse trabalho os valores de I_m e P_m foram obtidos mediante integração numérica.

12.2.1.5.- Diferença Percentual das Potências

Com o objetivo de mostrar a diferença existente entre a potência média do sistema e a calculada como a corrente média de soldagem vezes a tensão média do processo, define-se a diferença percentual das potências (ep , %) como segue:

$$ep = \frac{P_m - U_m \cdot I_m}{P_m} \cdot 100 = \frac{P_m - POT}{P_m} \cdot 100 \quad (\%) \quad [12.22]$$

A Fig.121 mostra que mantendo-se a potência média do sistema (P_m) constante e incrementando-se o valor da tensão de controle de pico da fonte (V_{R-p}), aumenta a diferença percentual entre as potências P_m e POT . Nesse trabalho, a corrente de base (I_b) foi mantida constante, portanto um incremento na tensão V_{R-p} implica um aumento no valor da corrente excesso $I_e (= I_p - I_b$, vide Figs.97-99), que afeta o valor da potência de excesso ($P_e = P_p - P_b$). Por exemplo, mantendo-se constante a $P_m = 6,0$ kW, $V_{R-p} = 8,5$ V a $ep \approx 16$ %, $V_{R-p} = 8,0$ V a $ep \approx 15$ %, $V_{R-p} = 7,5$ V a $ep \approx 14$ %.

Outra situação é manter constante a tensão V_{R-p} , por exemplo: em 7,5 V ($I_p = 404$ A) sendo a área abaixo do pulso constante, diminuindo-se o valor de T_{R-A} , o que implica um aumento da potência do sistema de 3,7 a 10,4 kW, como pode ser observado na Fig.121. A diferença percentual das potências (ep) diminui, de ≈ 19 a ≈ 4 %, conforme diminui o tempo T_b .

Mantendo-se constante a diferença percentual das potências (ep) em 12 %, $V_{R-p} = 8,5$ V a $P_m \approx 7,7$ kW, $V_{R-p} = 8,0$ V a $P_m \approx 7,3$ kW, $V_{R-p} = 7,5$ V a $P_m \approx 6,7$ kW.

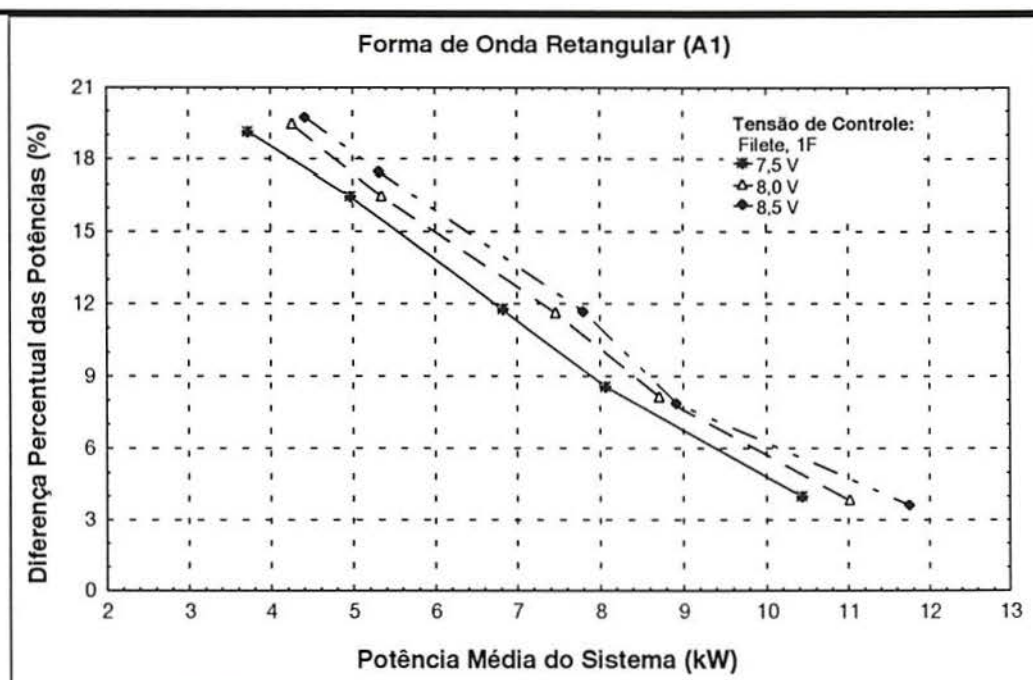


Fig.121: Diferença percentual das potências (ep , %) em função da interação da potência média do sistema (P_m) e da tensão de controle de pico da fonte (V_{R-p}), cordão de solda em filete, 1F.

12.2.2.- Forma de Onda Composta Decrescente (A5)

12.2.2.1.- Correntes Média e de Pico de Soldagem

As amostras dos sinais da corrente de soldagem, obtidas do sensor Hall, e da tensão do processo foram adquiridas em um total de quatro, para cada forma e frequência da onda de tensão

de controle utilizada na execução dos cordões de solda em filete, posição plana. Essas aquisições foram realizadas em diferentes tempos durante a soldagem.

Os valores da velocidade de alimentação do arame não foram estritamente constante em função do tempo, durante a realização dos cordões de solda, apresentando pequenas oscilações ($\pm 0,0127$ m/min). Isso pode ser devido à característica do sistema de alimentação de arame da fonte de soldagem, ou à interação da corrente de soldagem com seu próprio campo magnético.

Na Fig.122, são plotados os valores médios da corrente média de soldagem (I_m) em função da frequência da onda (F) e da tensão de controle de pico (V_{R-p}) da fonte, onde para um incremento na F corresponde um aumento no valor da I_m . Por exemplo, para $V_{R-p} = 7,5$ V, $F = 100$ Hz a $I_m \approx 137$ A, $F = 200$ Hz a $I_m \approx 211$ A, $F = 250$ Hz a $I_m \approx 246$ A. Incrementando a tensão de controle de pico (V_{R-p}), para uma mesma frequência, obtém-se um aumento no valor da I_m , por exemplo, para $F = 150$ Hz, $V_{R-p} = 7,5$ V a $I_m \approx 157$ A; $V_{R-p} = 8,0$ V a $I_m \approx 165$ A; $V_{R-p} = 8,5$ V a $I_m \approx 172$ A.

Na Fig.123, são plotados os valores observados das correntes média (I_m) e de pico (I_p) de soldagem em função da frequência da onda (F) e da tensão de controle de pico (V_{R-p}) da fonte de 7,5 V. O valor mínimo da I_p é aproximadamente igual a 393 A, que corresponde a uma frequência da onda de 150 Hz. Para uma frequência da onda de 100 Hz obtém-se o valor máximo de I_p , com aproximadamente igual a 412 A.

Na Fig.124, são plotados os valores observados das correntes média (I_m) e de pico (I_p) de soldagem em função da frequência da onda (F), tensão de controle de pico (V_{R-p}) da fonte de 8,0 V. O valor mínimo da I_p , aproximadamente igual a 404 A, corresponde a uma frequência da onda de 150 Hz. O valor máximo da I_p , aproximadamente igual a 438 A, corresponde a uma frequência da onda de 200 Hz.

Na Fig.125, são plotados os valores observados das correntes média (I_m) e de pico (I_p) de soldagem em função da frequência da onda (F), tensão de controle de pico (V_{R-p}) da fonte de 8,5 V. O valor mínimo da I_p , aproximadamente igual a 415 A, corresponde a uma frequência da onda de 150 Hz. O valor máximo da I_p , aproximadamente igual a 458 A, corresponde a uma frequência da onda de 100 Hz.

As Figs.123-125, mostram que a frequência da onda exerce um ligeiro efeito sobre a corrente de pico.

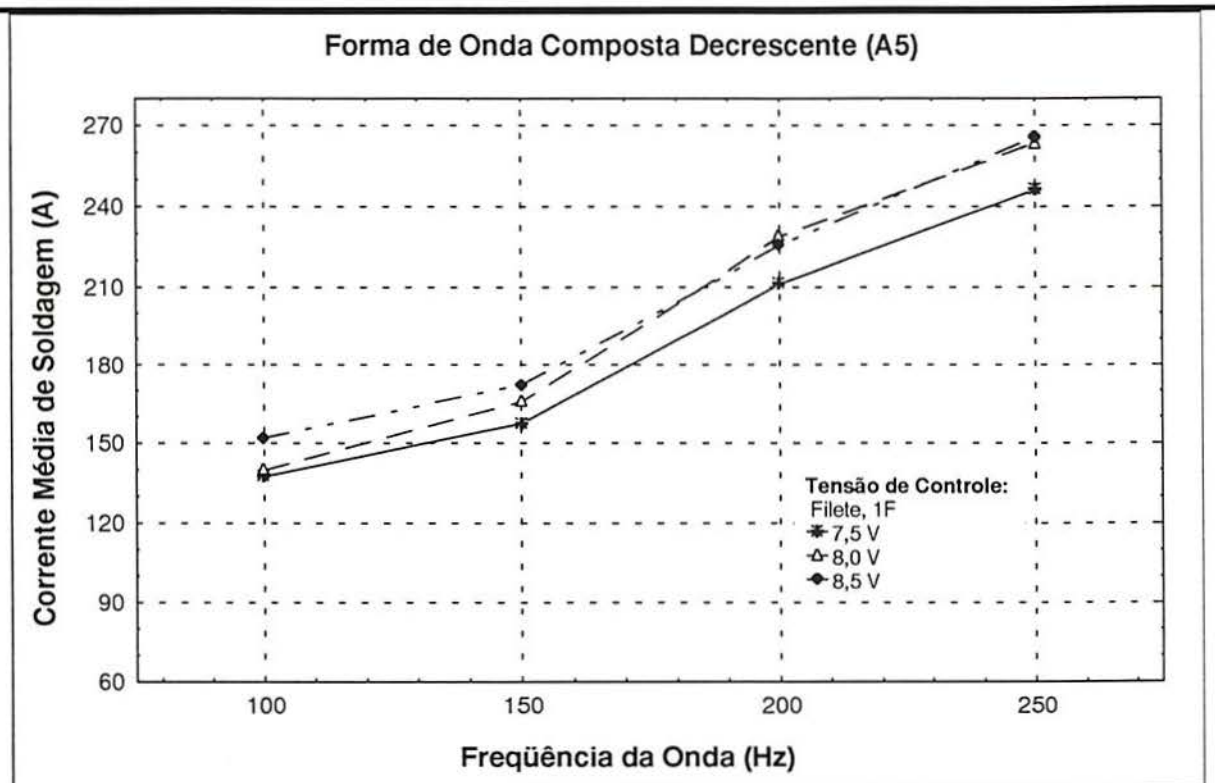


Fig.122: Valores médios observados da corrente média de soldagem em função da frequência da onda e da tensão de controle de pico da fonte, cordão de solda em filete, 1F.

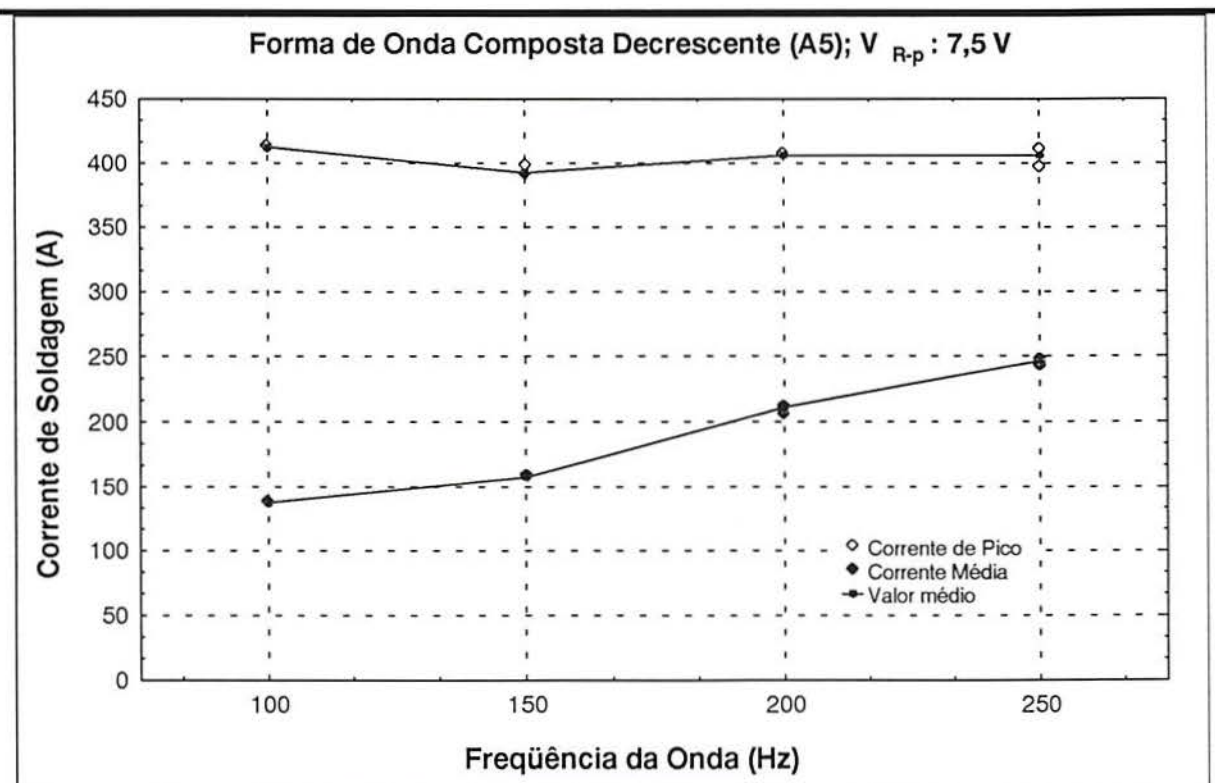


Fig.123: Valores observados das correntes média e pico de soldagem em função da frequência da onda, tensão de controle de pico da fonte (V_{R-p}) 7,5 V, cordão de solda em filete, 1F.

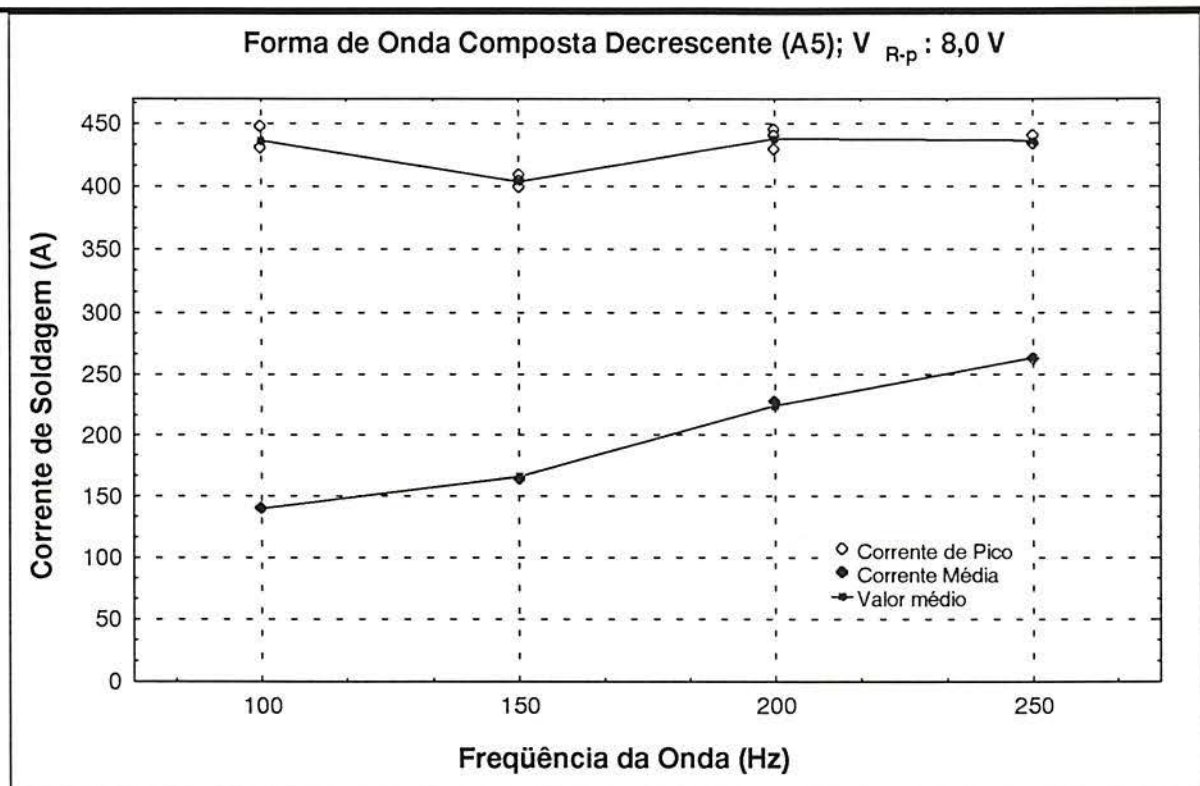


Fig.124: Valores observados das correntes média e pico de soldagem em função da frequência da onda, tensão de controle de pico da fonte (V_{R-p}) 8,0 V, cordão de solda em filete, 1F.

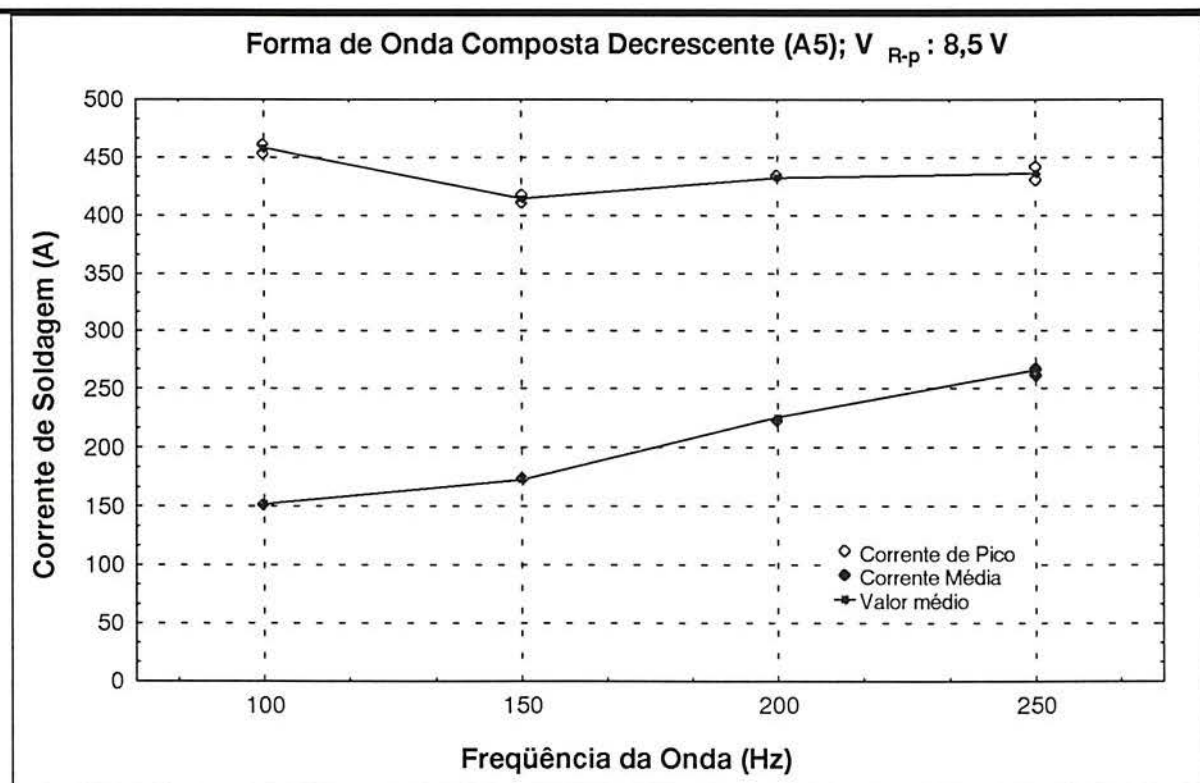


Fig.125: Valores observados das correntes média e pico de soldagem em função da frequência da onda, tensão de controle de pico da fonte (V_{R-p}) 8,5 V, cordão de solda em filete, 1F.

12.2.2.2.- Oscilogramas da Corrente de Soldagem, Tensão do Processo e Potência

O objetivo é mostrar os formatos dos pulsos obtidos na saída da fonte de soldagem, para cada combinação de tratamento e forma de onda de tensão de controle composta decrescente (A5), referente aos valores mostrados na Tabela 9 (parte experimental).

Os oscilogramas da tensão do processo ($u(t)$) e da corrente de soldagem ($i(t)$) revelaram que a tensão varia (rapidamente) em função da variação da corrente de soldagem, por exemplo: a tensão aumenta conforme a corrente de base (I_b), passando para o valor de pico (I_p), como pode ser observado nas Figs.126-137. Esse aumento da corrente (tensão ou potência) tem forma exponencial. O valor da potência instantânea do sistema ($p(t)$) aumenta mais do que o produto da tensão média pela corrente instantânea de soldagem ($Pot = U_m \cdot i(t)$) como mostram as Figs.126-137. Portanto, a potência média do sistema (P_m) deve ser utilizada na determinação do valor real da potência no processo MIG/MAG pulsado, porque durante a aplicação do pulso de corrente há alteração na corrente instantânea de soldagem, que é acompanhada pela variação da tensão do processo.

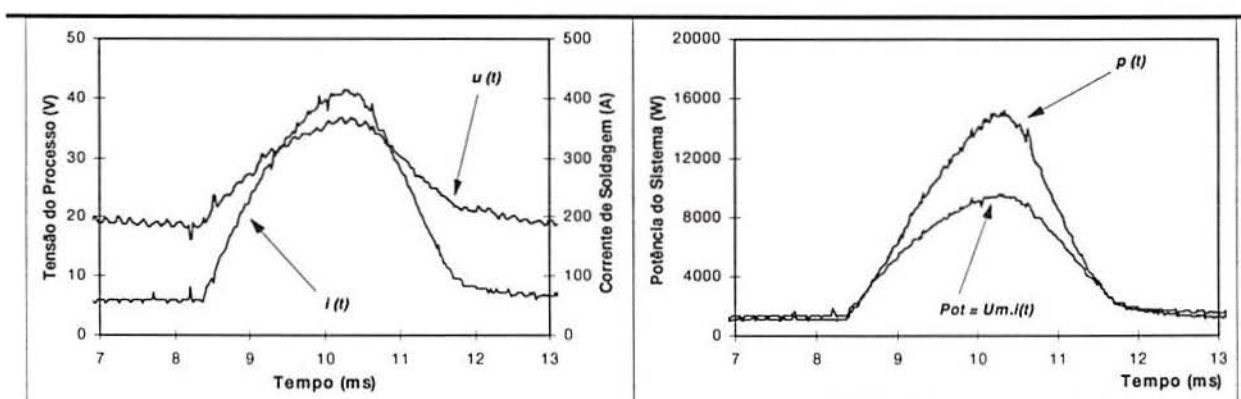


Fig.126: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 100$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 7,5 V, forma de onda composta decrescente (A5), junta filete, posição plana (1F).

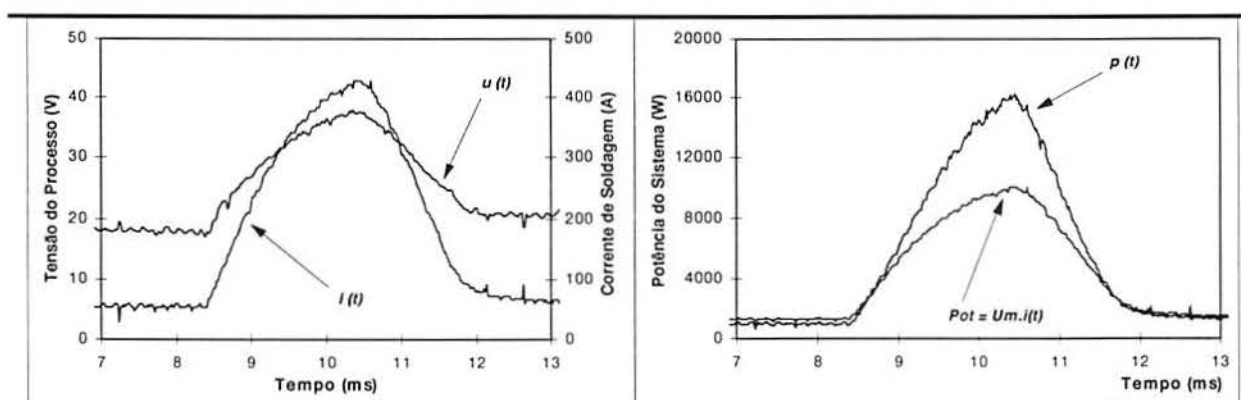


Fig.127: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 100$ Hz, tensão de controle (V_{R-p}) = 8,0 V, forma de onda composta decrescente (A5), junta filete, posição plana (1F).

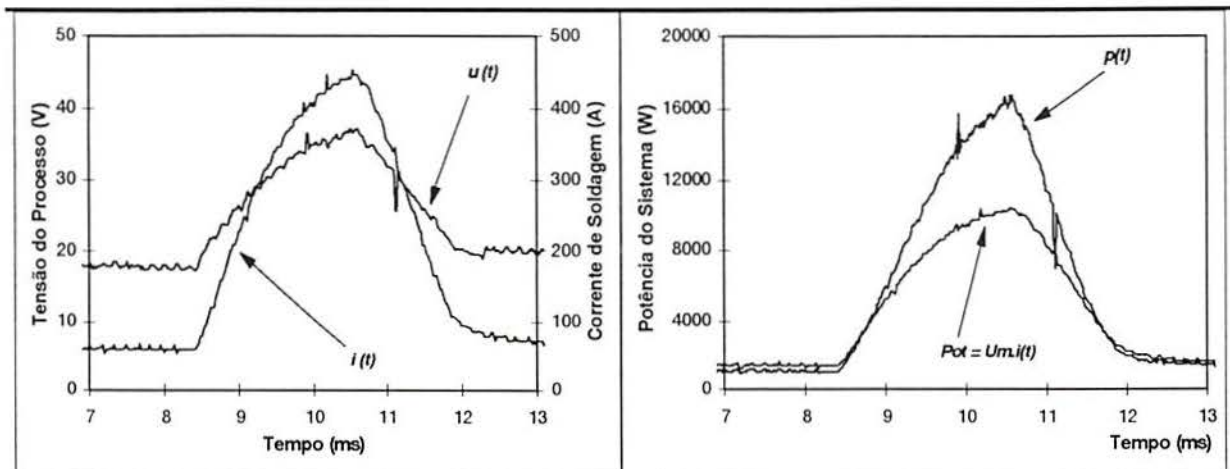


Fig.128: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 100$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda composta decrescente (A5), junta filete, posição plana (1F).

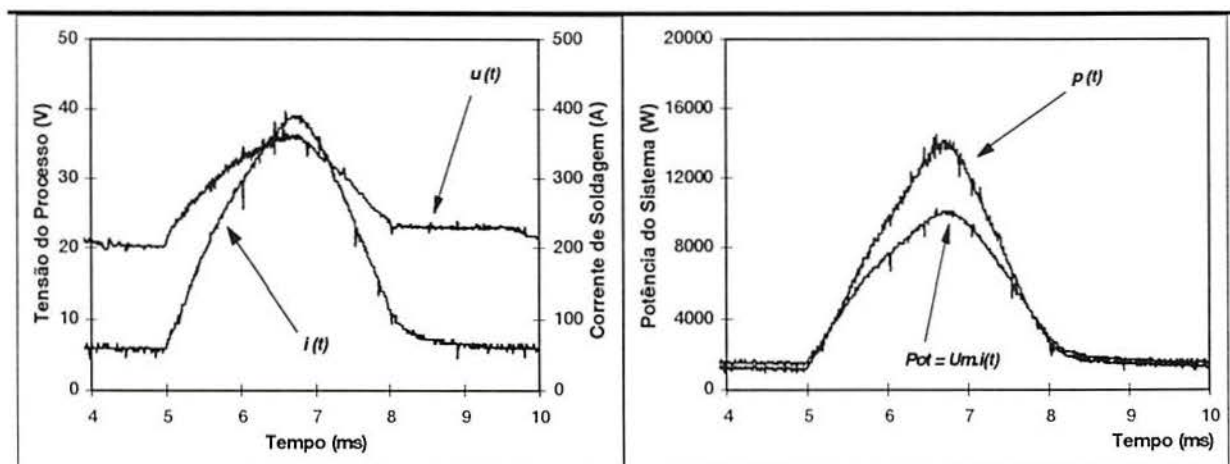


Fig.129: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 150$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 7,5 V, forma de onda composta decrescente (A5), junta filete, posição plana (1F).

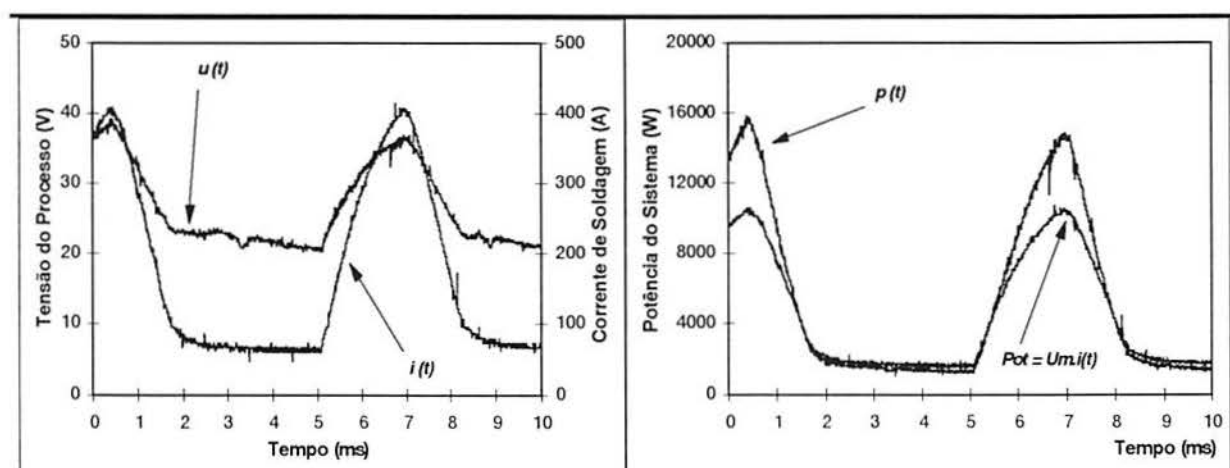


Fig.130: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 150$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,0 V, forma de onda composta decrescente (A5), junta filete, posição plana (1F).

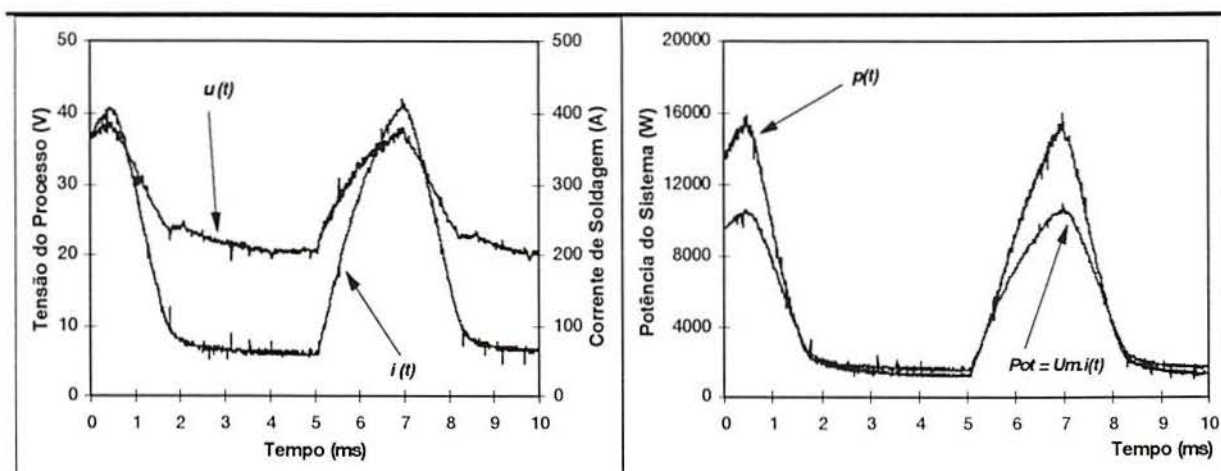


Fig.131: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 150$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda composta decrescente (A5), junta filete, posição plana (1F).

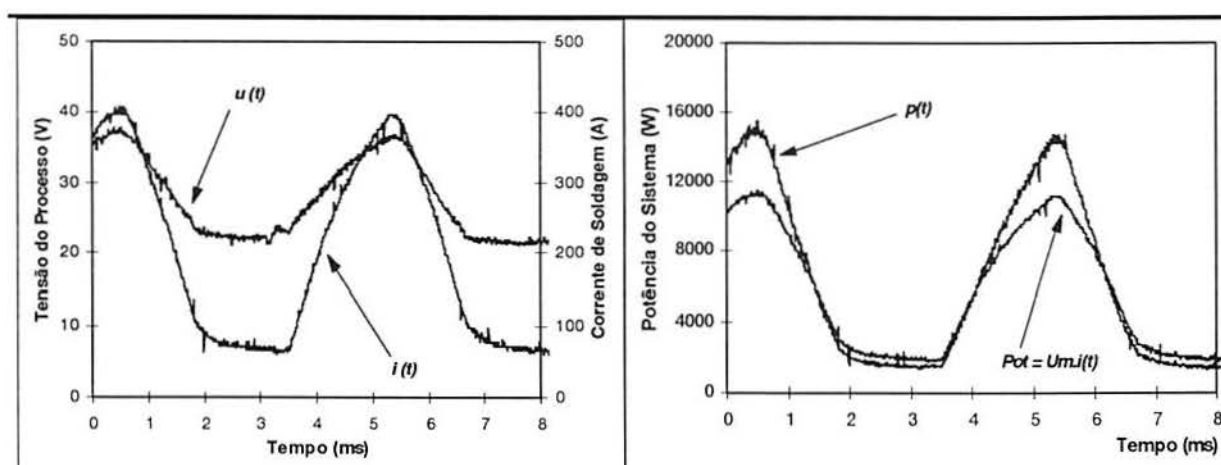


Fig.132: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 200$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 7,5 V, forma de onda composta decrescente (A5), junta filete, posição plana (1F).

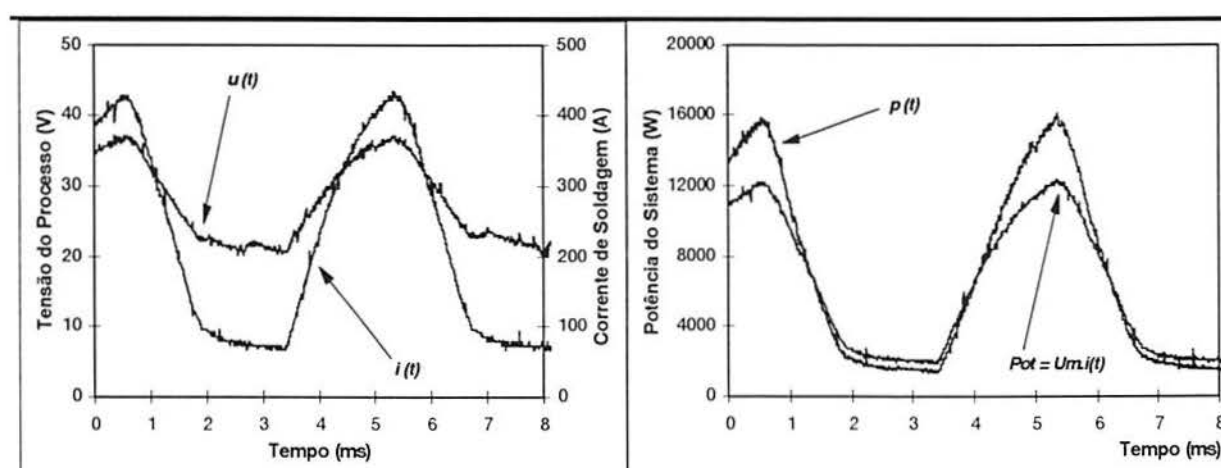


Fig.133: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 200$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,0 V, forma de onda composta decrescente (A5), junta filete, posição plana (1F).

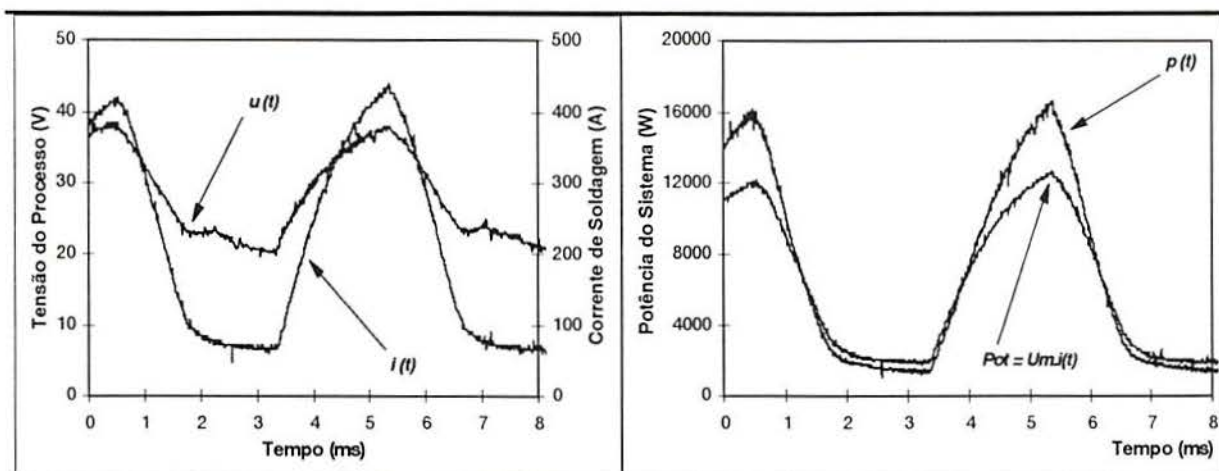


Fig.134: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 200$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda composta decrescente (A5), junta filete, posição plana (1F).

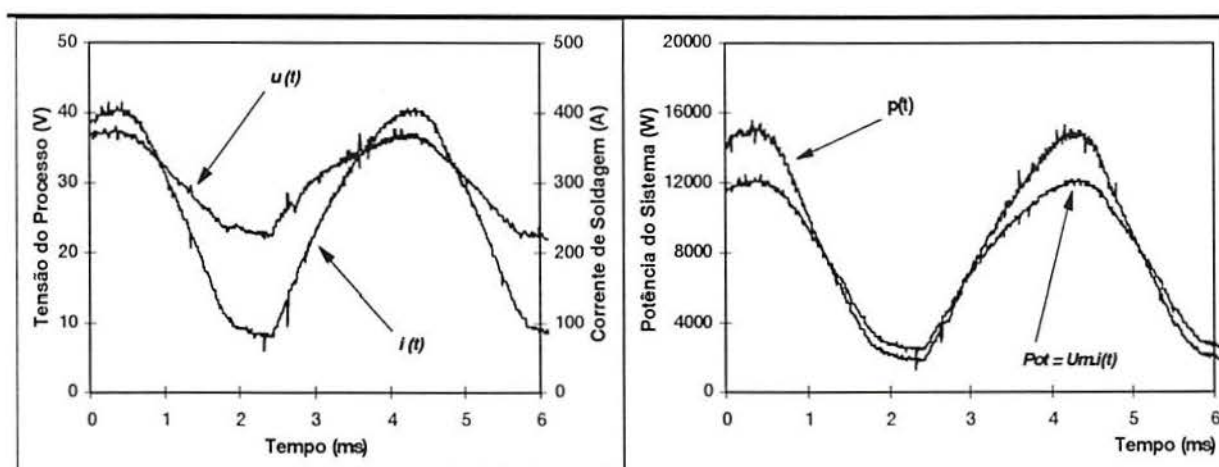


Fig.135: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 250$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 7,5 V, forma de onda composta decrescente (A5), junta filete, posição plana (1F).

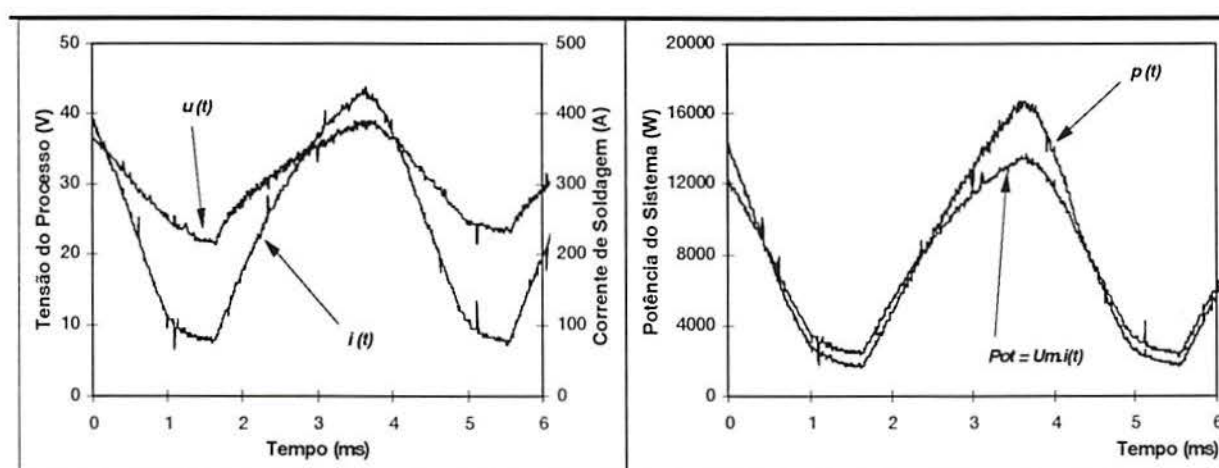


Fig.136: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 250$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,0 V, forma de onda composta decrescente (A5), junta filete, posição plana (1F).

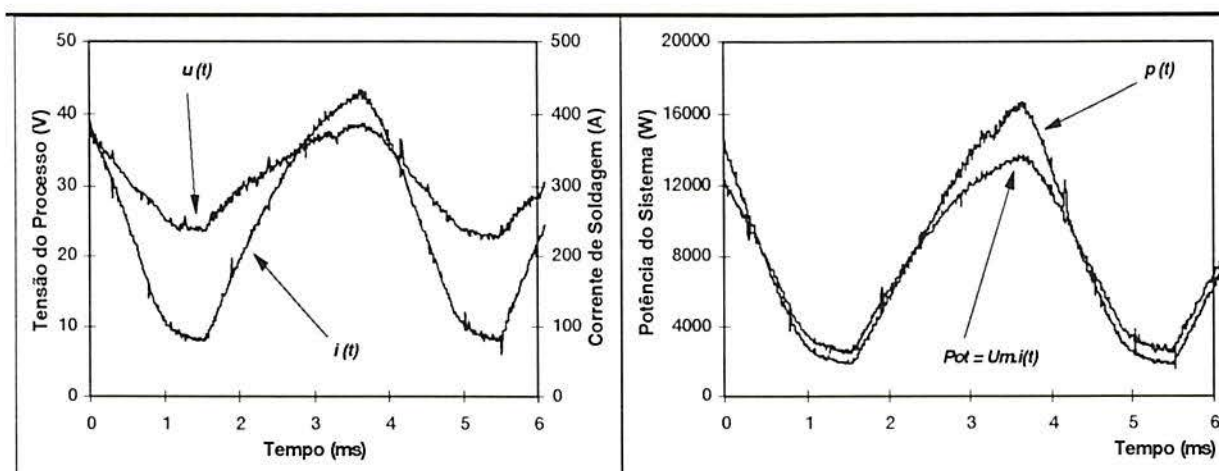


Fig.137: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 250$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda composta decrescente (A5), junta filete, posição plana (1F).

12.2.2.3.- Diferença Percentual das Potências

A Fig.138 mostra que mantendo-se a potência média do sistema (P_m) constante e incrementando-se o valor da tensão de controle de pico da fonte (V_{R-p}), aumenta a diferença percentual entre as potências P_m e POT . Nesse trabalho, a corrente de base (I_b) foi mantida constante, portanto um incremento na tensão V_{R-p} implica um aumento no valor da corrente excesso $I_e (= I_p - I_b$, vide Figs.123-125), que afeta o valor da potência de excesso ($P_e = P_p - P_b$). Por exemplo, mantendo-se constante a $P_m = 7,0$ kW, $V_{R-p} = 8,5$ V a $ep \approx 11,5$ %, $V_{R-p} = 8,0$ V a $ep \approx 11$ %, $V_{R-p} = 7,5$ V a $ep \approx 9,5$ %.

Outra situação é manter constante a tensão V_{R-p} , por exemplo: em 7,5 V sendo a área abaixo do pulso de controle constante, diminuindo-se o valor de T_{R-4} (na saída T_4), o que implica um aumento da potência do sistema, de 3,8 a 8 kW, como pode ser observado na Fig.138. A diferença percentual das potências diminui, de ≈ 18 a ≈ 7 %, conforme diminui o tempo T_4 .

Mantendo-se constante a diferença percentual das potências (ep) em 12 %, $V_{R-p} = 8,5$ V a $P_m \approx 6,7$ kW, $V_{R-p} = 8,0$ V a $P_m \approx 6,0$ kW, $V_{R-p} = 7,5$ V a $P_m \approx 5,6$ kW.

No processo MIG/MAG pulsado, a combinação de valores dos parâmetros da onda afetam a diferença percentual das potências (ep , %), portanto, a potência média do sistema (P_m) deve ser utilizada para calcular a potência média real do sistema.

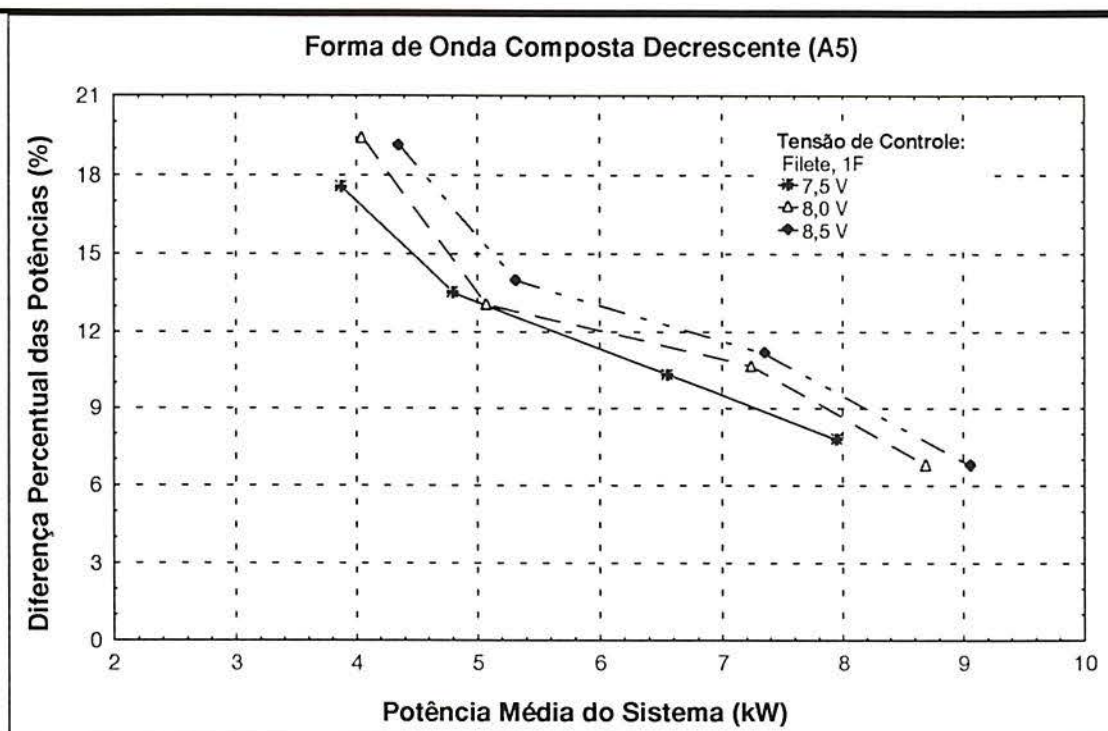


Fig.138: Diferença percentual das potências (ep , %) em função da interação da potência média do sistema (P_m) e a tensão de controle de pico da fonte (V_{R-p}), cordão de solda em filete, 1F.

12.2.3.- Forma de Onda Triangular (A7)

12.2.3.1.- Correntes Média e de Pico de Soldagem

As amostras dos sinais da corrente de soldagem, obtidas do sensor Hall, e da tensão do processo foram adquiridas em um total de quatro, para cada forma e frequência da onda de tensão de controle utilizada na execução dos cordões de solda em filete, posição plana. Essas aquisições foram realizadas em diferentes tempos durante a soldagem.

Os valores da velocidade de alimentação do arame não foram estritamente constante em função do tempo, durante a realização dos cordões de solda, apresentando pequenas oscilações ($\pm 0,0127$ m/min). Isso pode ser devido à característica do sistema de alimentação de arame da fonte de soldagem, ou à interação da corrente de soldagem com seu próprio campo magnético.

A Fig.139 mostra os tempos de crescimento e decréscimo da onda de tensão de controle da fonte de soldagem para os valores de frequência utilizados (vide Tabela 10).

Na Fig.140, são plotados os valores observados da corrente média de soldagem em função dos tempos de crescimento (T_{R-1}) e decréscimo (T_{R-3}) da onda, e da tensão de controle de pico (V_{R-p}), para a forma de onda triangular (A7). Observa-se que quanto maior o valor da tensão de controle de pico maior é o valor da corrente média de soldagem, para qualquer valor de T_{R-1} e T_{R-3} .

Por exemplo, quando $T_{R-I} = T_{R-3} = 2,5$ ms ($F = 200$ Hz), $V_{R-p} = 7,5$ V a $I_m \approx 163$ A; $V_{R-p} = 8,0$ V a $I_m \approx 180$ A; $V_{R-p} = 8,5$ V a $I_m \approx 200$ A.

Mantendo constante $T_{R-I} = T_{R-3} = 3,3$ ms ($F = 150$ Hz) obteve-se valor máximo da corrente média de soldagem para cada nível de tensão de pico de controle, por exemplo, $V_{R-p} = 7,5$ V a $I_m \approx 179$ A; $V_{R-p} = 8,0$ V a $I_m \approx 203$ A; $V_{R-p} = 8,5$ V a $I_m \approx 214$ A.

Quanto menor o valor dos tempos T_{R-I} e T_{R-3} (maior é a F) menor é o valor da corrente média de soldagem. Da Fig.139, quando $T_{R-I} = T_{R-3} = 1,6$ ms ($F = 300$ Hz), $V_{R-p} = 8,5$ V a $I_m \approx 188$ A; $V_{R-p} = 8,0$ V a $I_m \approx 175$ A; e para $V_{R-p} = 7,5$ V não foi possível obter estabilidade com um alto nível de salpico, portanto os oscilogramas de corrente e tensão não foram periódicos.

A Fig.141 mostra os valores observados das correntes média e de pico em função da frequência da onda, para $V_{R-p} = 7,5$ V. Para frequências de 100 e 150 Hz ($T_{R-I} = T_{R-3} = 5$ e 3,3 ms, respectivamente), se obtém a corrente de pico (I_p) de ≈ 385 A. No entanto, quando há um aumento da F em valores entre 200 e 250 Hz, a corrente de pico é afetada e seu valor diminui a ≈ 350 A. O intervalo da corrente média de soldagem (I_m) é de 165 a 180 A.

A Fig.142 mostra os valores observados das correntes de média (I_m) e pico (I_p), em função da frequência da onda, para $V_{R-p} = 8,0$ V. Observa-se que o valor máximo da corrente de pico (I_p) ≈ 430 A, para uma $F = 100$ Hz ($T_{R-I} = T_{R-3} = 5$ ms). No entanto, para um aumento de frequência observa-se uma diminuição no valor da corrente de pico. O valor mínimo da $I_p \approx 350$ A, se obtém com uma frequência de 300 Hz. O intervalo de corrente média de soldagem (I_m) obtido é de 170 a 200 A.

A Fig.143 mostra os valores observados das correntes de média (I_m) e pico (I_p), em função da frequência da onda, para $V_{R-p} = 8,5$ V. Observa-se que o valor máximo da corrente de pico (I_p) ≈ 450 A, para uma $F = 100$ Hz ($T_{R-I} = T_{R-3} = 5$ ms). No entanto, para um aumento de frequência observa-se uma diminuição na I_p . O valor mínimo da $I_p \approx 350$ A, se obtém com uma F de 300 Hz. O intervalo de corrente média de soldagem (I_m) obtido é de 186 a 212 A.

Os tempos de crescimento e decréscimo da onda foram iguais, $T_{R-I} = T_{R-3}$, porém, o que influi no valor da corrente de pico é T_{R-I} . Mantendo-se constante a tensão V_{R-p} , quanto menor é o tempo T_{R-I} menor é o valor da corrente de pico (I_p). Quando o tempo $T_{R-I} = 5$ ms ($F = 100$ Hz) a corrente de pico atinge seu valor máximo, em cada nível de tensão de controle de pico (V_{R-p}).

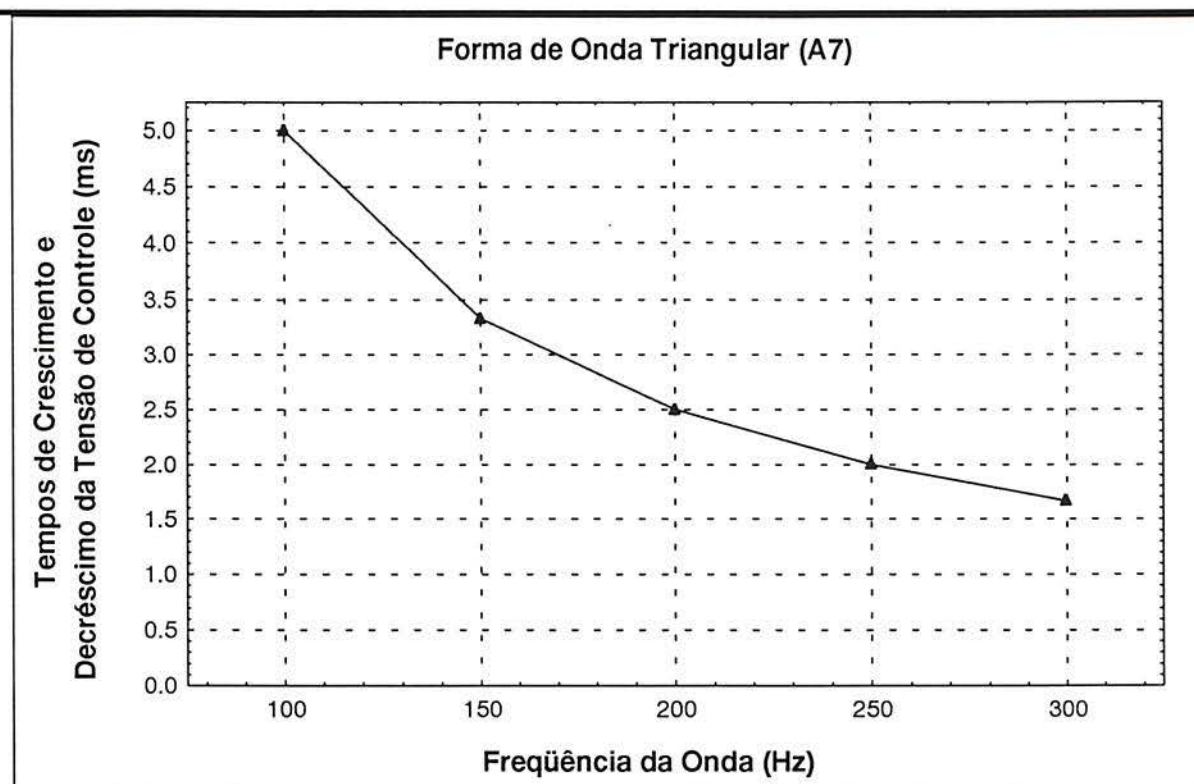


Fig.139: Tempos de crescimento (T_{R-1}) e decréscimo (T_{R-3}) da tensão de controle para os valores de frequência da onda.

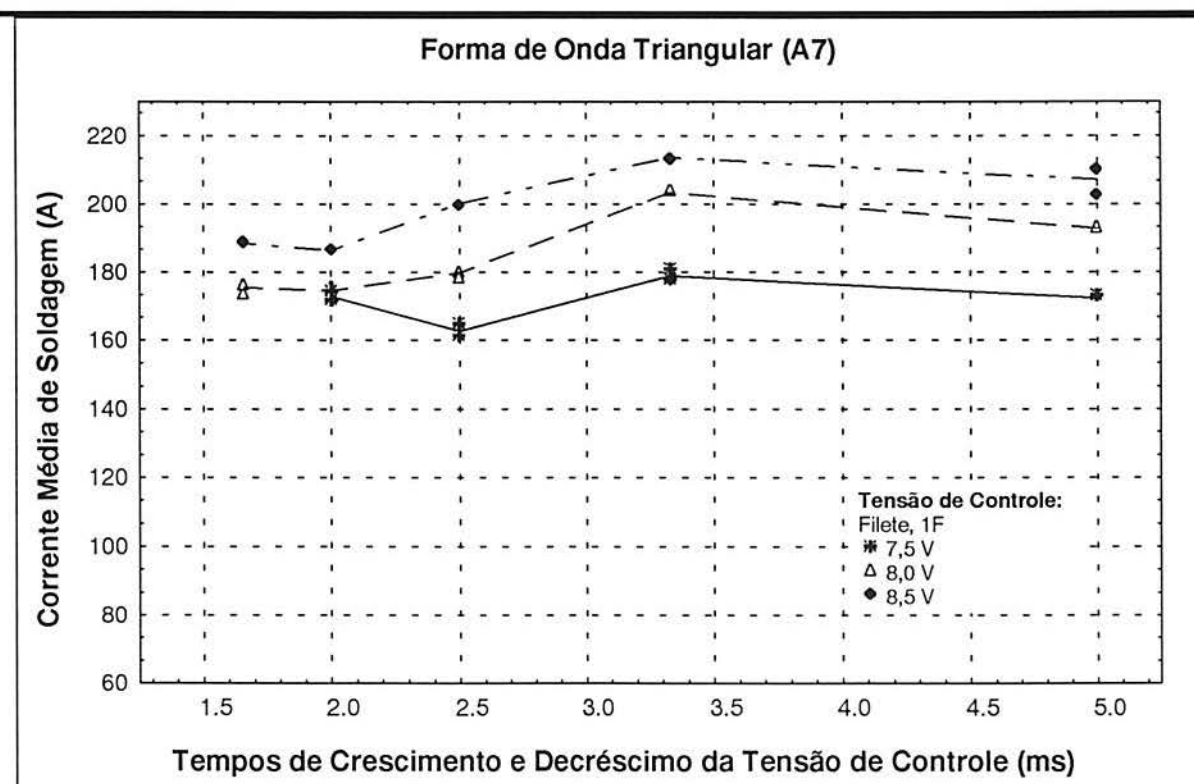


Fig.140: Valores observados da corrente média de soldagem em função dos tempos de crescimento (T_{R-1}) e decréscimo (T_{R-3}) da tensão de controle, e tensão de controle de pico.

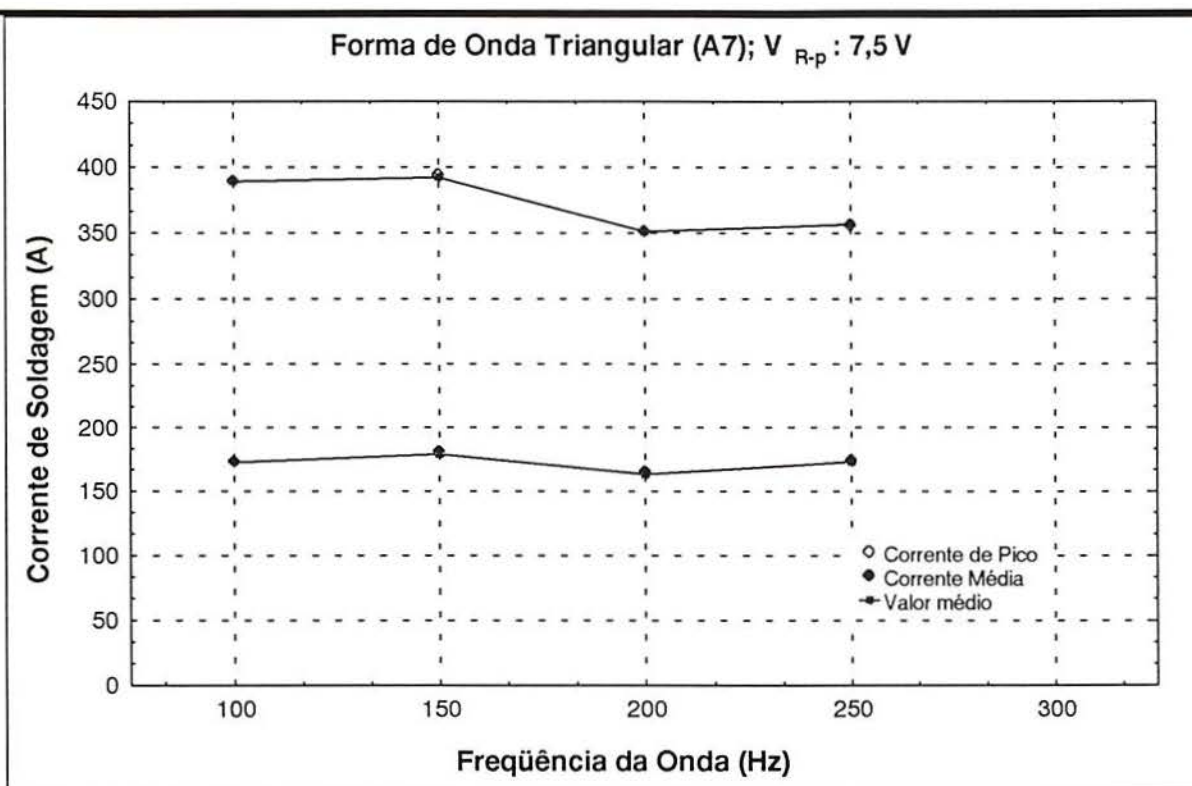


Fig.141: Valores observados das correntes média e pico de soldagem em função da frequência da onda, tensão de controle de pico (V_{R-p}) 7,5 V, cordão de solda em filete, 1F.

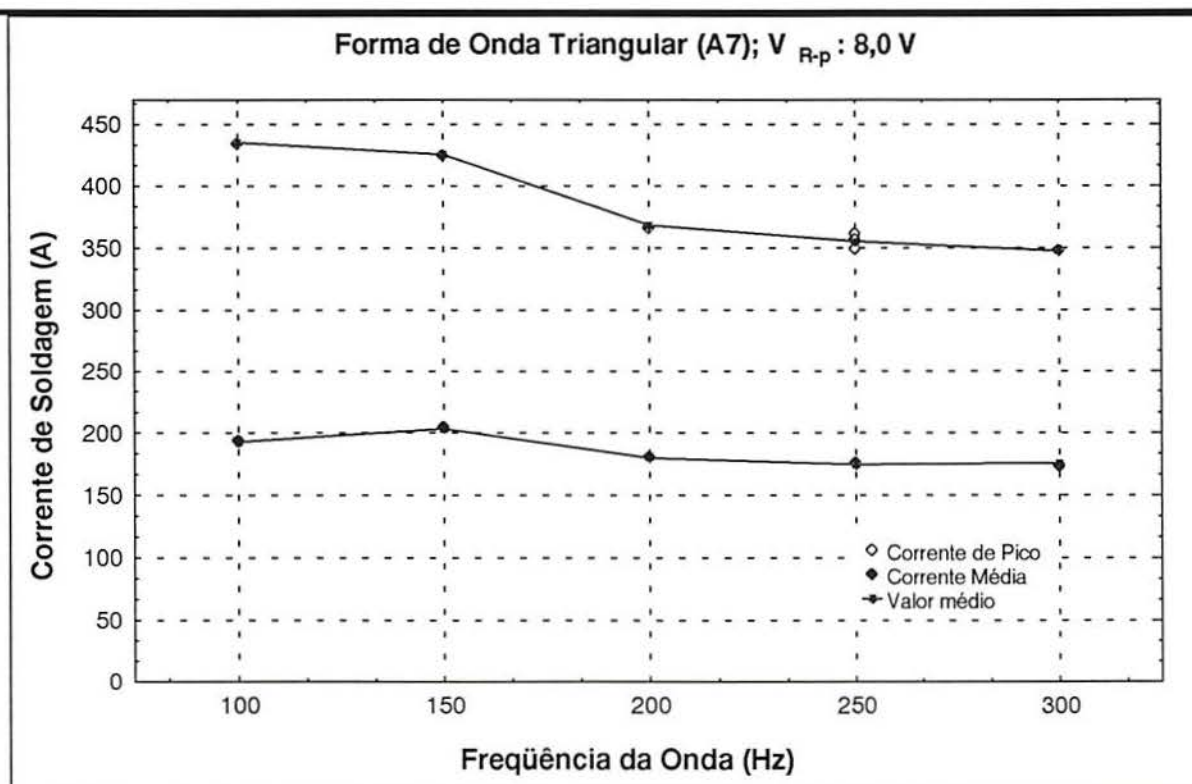


Fig.142: Valores observados das correntes média e pico de soldagem em função da frequência da onda, tensão de controle de pico (V_{R-p}) 8,0 V, cordão de solda em filete, 1F.

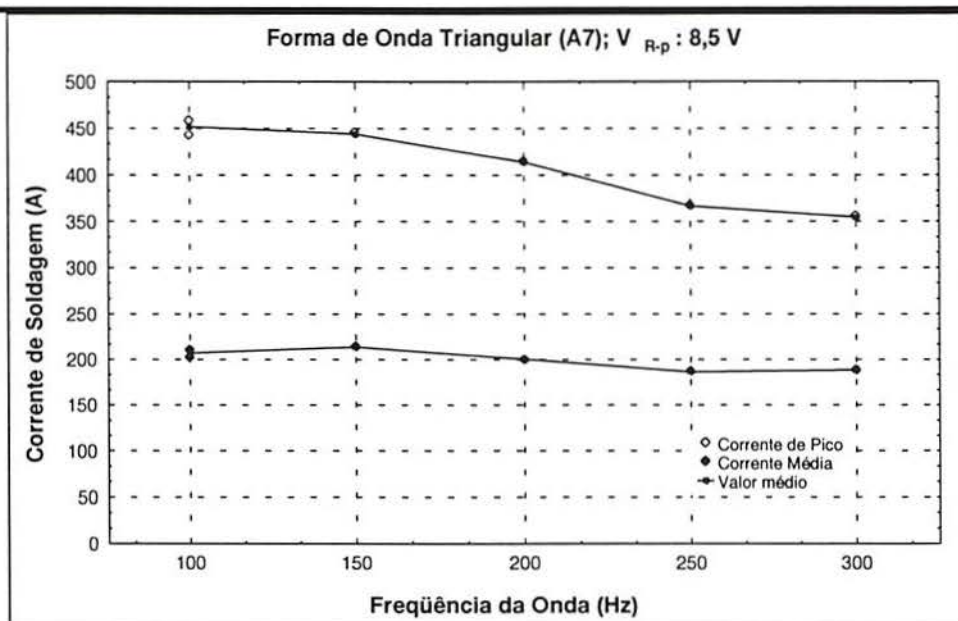


Fig.143: Valores observados das correntes média e pico de soldagem em função da frequência da onda, tensão de controle de pico (V_{R-p}) 8,5 V, cordão de solda em filete, 1F.

12.2.3.2.- Oscilogramas da Corrente de Soldagem, Tensão do Processo e Potência

O objetivo é mostrar os formatos dos pulsos obtidos na saída da fonte de soldagem, para cada combinação de tratamento e forma de onda de tensão de controle triangular (A7), referente aos parâmetros mostrados na Tabela 10 (parte experimental).

Os oscilogramas da tensão do processo ($u_{(t)}$) e da corrente de soldagem ($i_{(t)}$) revelaram que a tensão varia (rapidamente) em função da variação da corrente de soldagem, por exemplo: a tensão diminui conforme a corrente de pico (I_p), passando para o valor de base (I_b), como pode ser observado nas Figs.144-157. O valor da potência instantânea do sistema ($p_{(t)}$) aumenta mais do que o produto da tensão média pela corrente instantânea de soldagem ($Pot = U_m \cdot i_{(t)}$) como mostram as Figs.144-157. Portanto, a potência média do sistema (P_m) deve ser utilizada na determinação do valor real da potência no processo MIG/MAG pulsado, porque durante a aplicação do pulso de corrente há alteração na corrente instantânea de soldagem, que é acompanhada pela variação da tensão do processo.

Comparando-se os parâmetros da tensão de controle da fonte ($V_{R(t)}$), mostrados na Tabela 10, com os obtidos nos oscilogramas da corrente de soldagem ($i_{(t)}$), tensão do processo ($u_{(t)}$), e potência do sistema ($p_{(t)}$) mostrados nas Figs.144-157, observa-se que:

.- Mantendo-se constante a V_{R-p} , o valor da corrente de pico diminui conforme o tempo T_{R-I} , resultando na redução do valor da corrente média de soldagem (vide Figs.141-143).

.- Na saída da fonte de soldagem, para todas as combinações de tratamento, obteve-se valores de tempo T_4 diferente de zero, enquanto que na entrada o tempo $T_{R-4} = 0$. Para $F = 100$ Hz, $V_{R-p} = 7,5$ V a $T_4 \approx 3,5$ ms; $V_{R-p} = 8,0$ V a $T_4 \approx 3$ ms; $V_{R-p} = 8,5$ V a $T_4 \approx 3$ ms. Para $F = 300$ Hz, $V_{R-p} = 8,0$ V a $T_4 \approx 0,9$ ms; $V_{R-p} = 8,5$ V a $T_4 \approx 0,8$ ms. Esse comportamento não foi estudado porque não faz parte do objetivo desse trabalho.

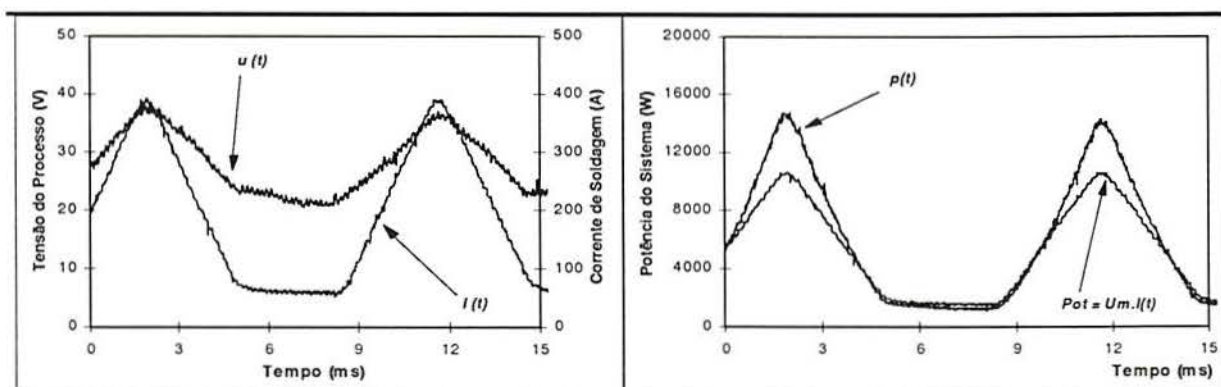


Fig.144: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 100$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 7,5 V, forma de onda triangular (A7), junta filete, posição plana (1F).

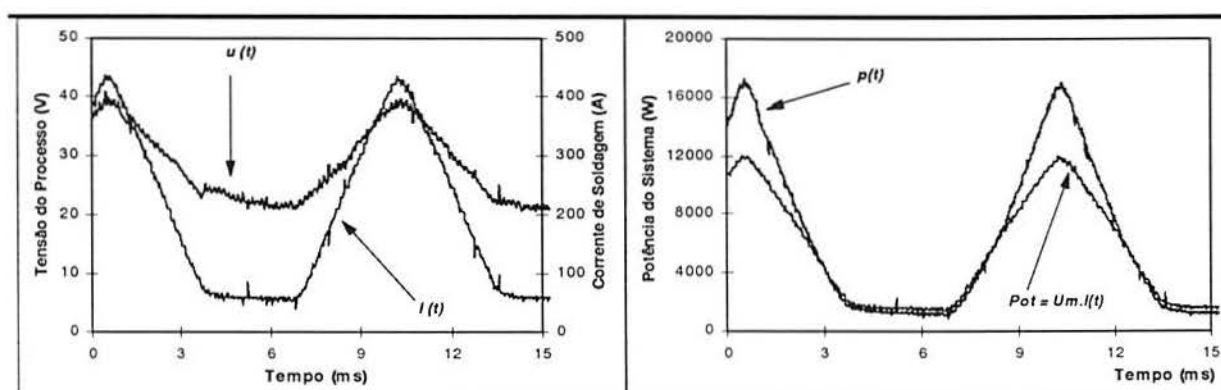


Fig.145: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 100$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,0 V, forma de onda triangular (A7), junta filete, posição plana (1F).

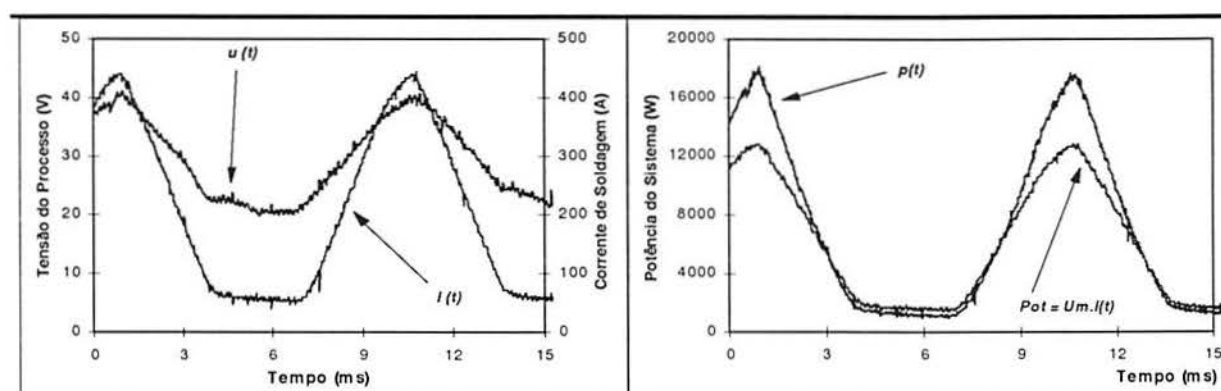


Fig.146: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 100$ Hz, tensão de controle de pico = 8,5 V, forma de onda triangular (A7), junta filete, (1F).

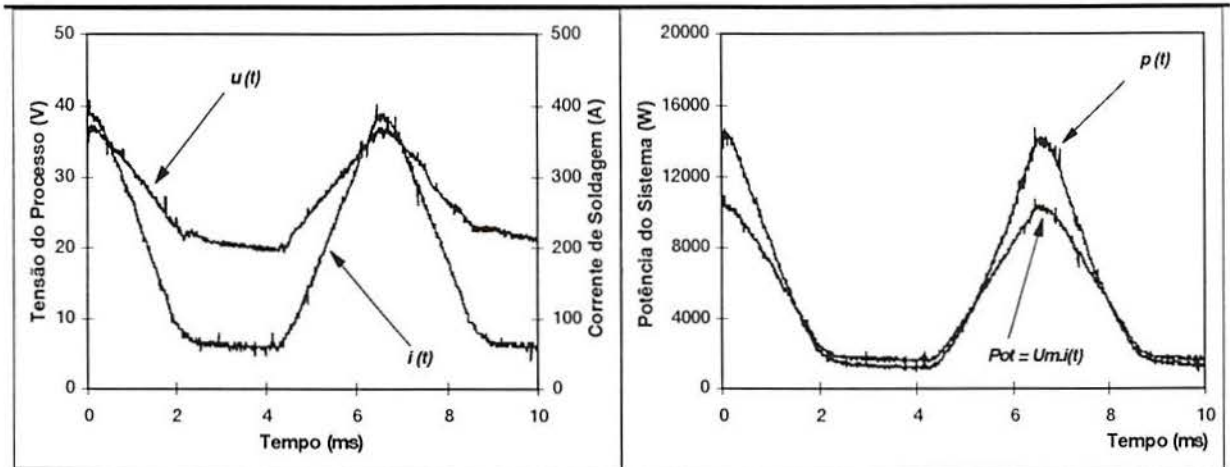


Fig.147: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 150$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 7,5 V, forma de onda triangular (A7), junta filete, posição plana (1F).

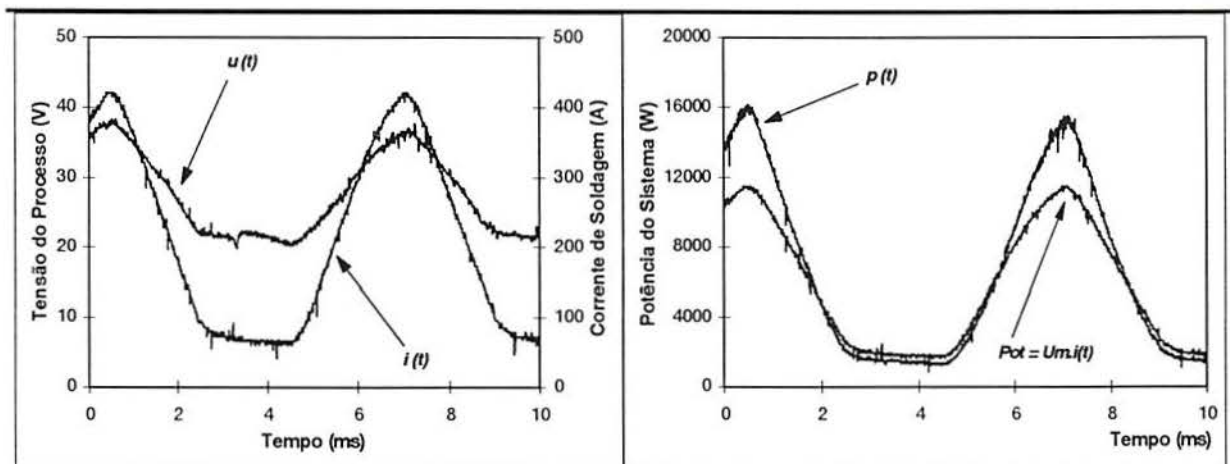


Fig.148: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 150$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,0 V, forma de onda triangular (A7), junta filete, posição plana (1F).

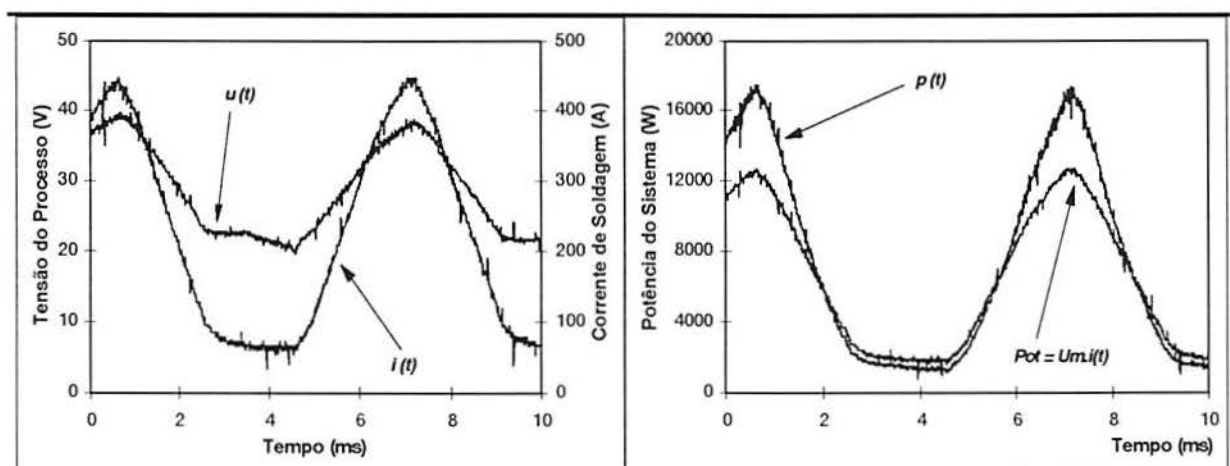


Fig.149: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 150$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda triangular (A7), junta filete, posição plana (1F).

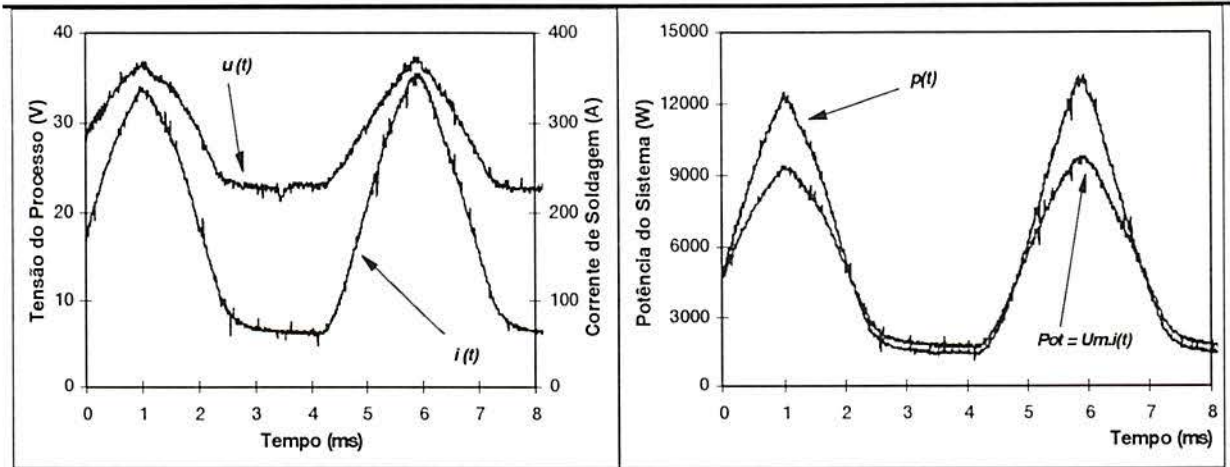


Fig.150 Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 200$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 7,5 V, forma de onda triangular (A7), junta filete, posição plana (1F).

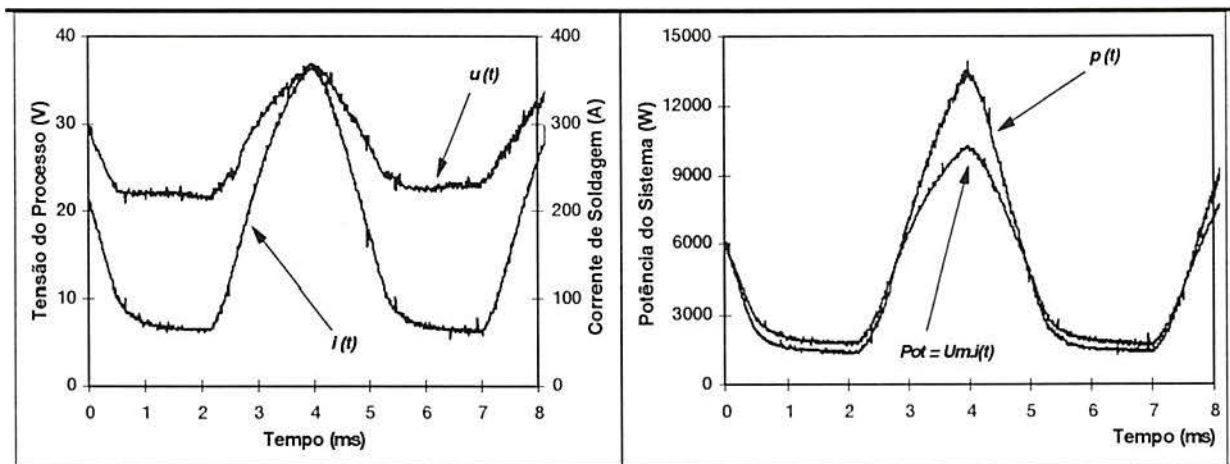


Fig.151: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 200$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,0 V, forma de onda triangular (A7), junta filete, posição plana (1F).

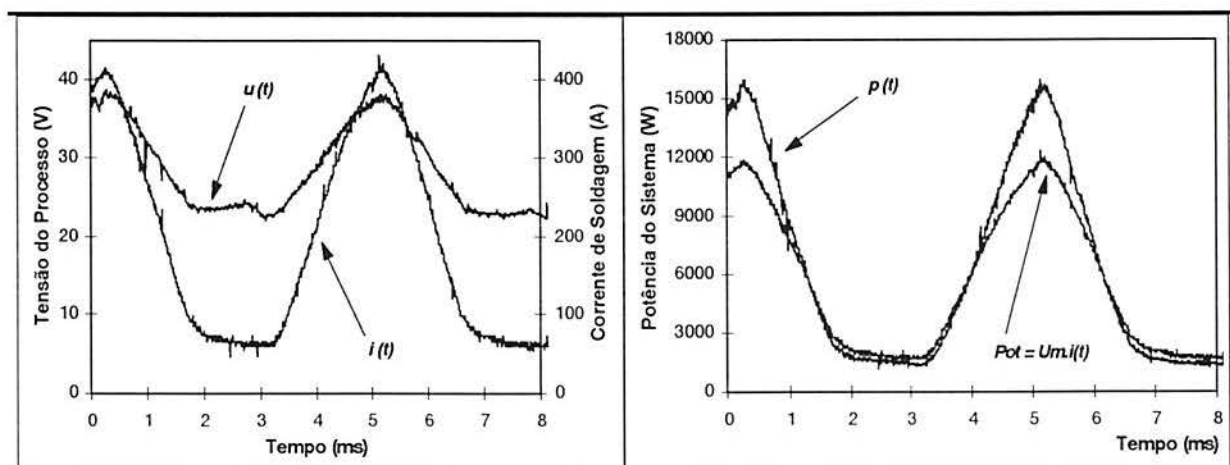


Fig.152: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 200$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda triangular (A7), junta filete, posição plana (1F).

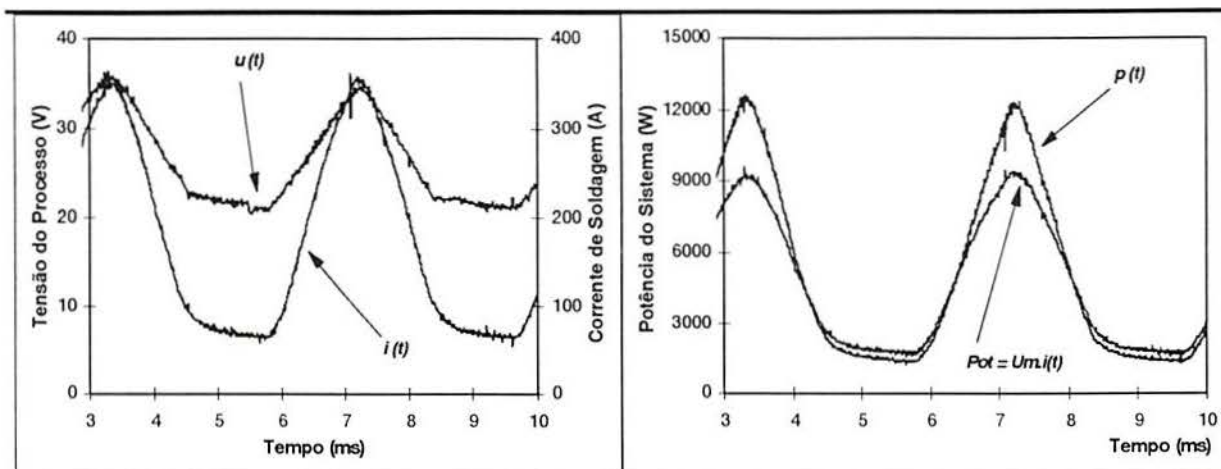


Fig.153: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 250$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 7,5 V, forma de onda triangular (A7), junta filete, posição plana (1F).

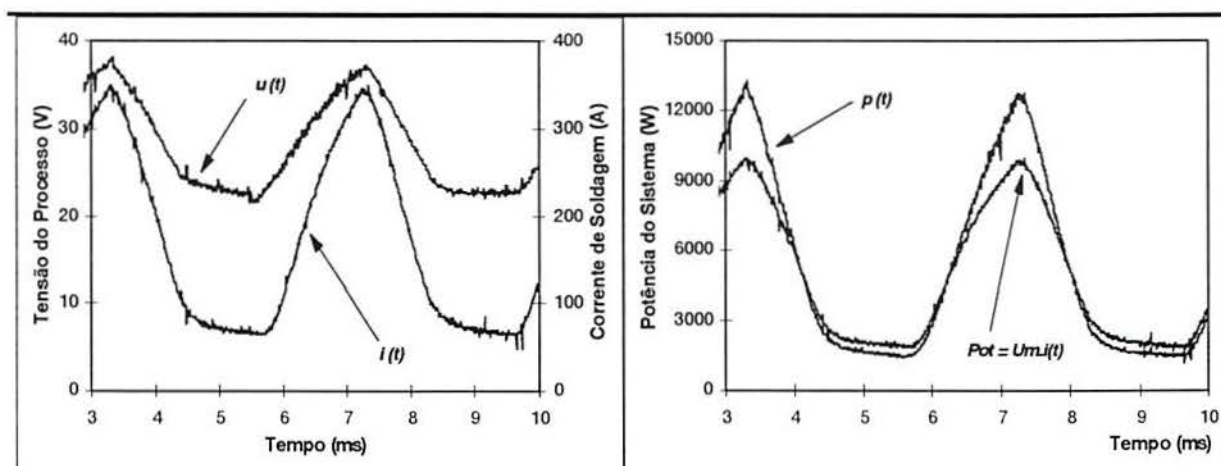


Fig.154: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 250$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,0 V, forma de onda triangular (A7), junta filete, posição plana (1F).

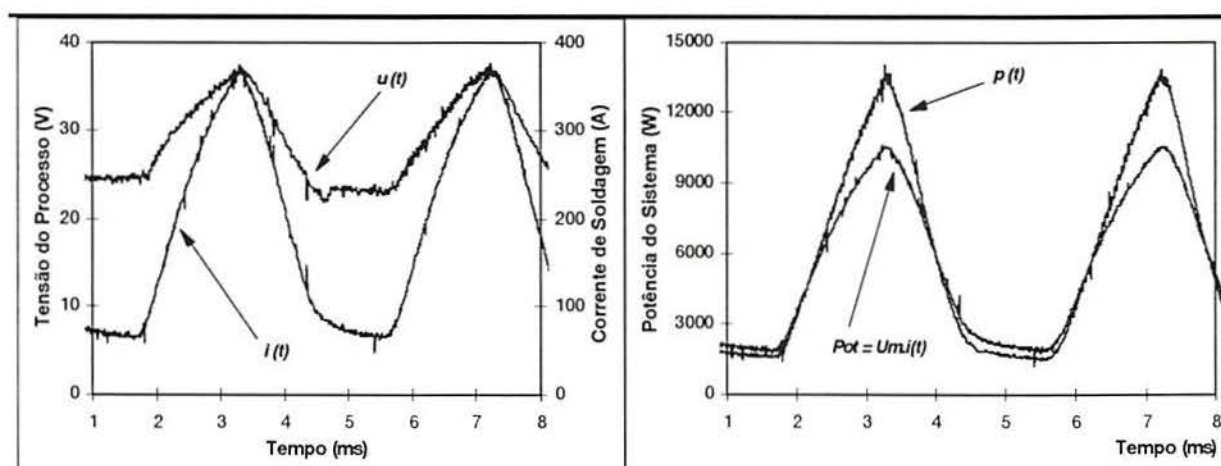


Fig.155: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 250$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda triangular (A7), junta filete, posição plana (1F).

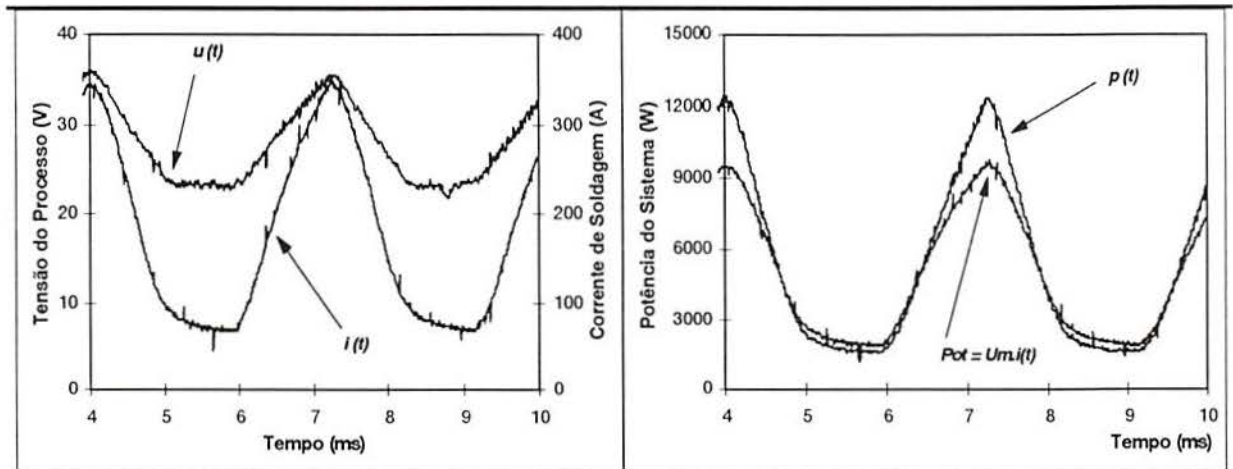


Fig.156: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 300$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,0 V, forma de onda triangular (A7), junta filete, posição plana (1F).

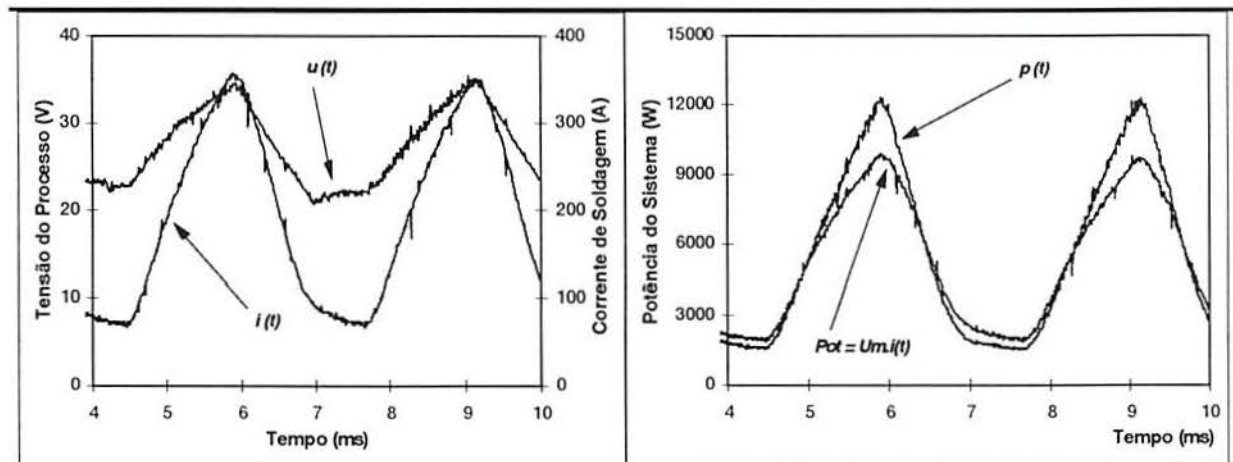


Fig.157: Oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, $F = 300$ Hz, tensão de controle de pico (V_{R-p}) = 8,5 V, forma de onda triangular (A7), junta filete, posição plana (1F).

12.3.- Eficiência de Fusão do Arame

12.3.1.- Cordões de Solda “Bead-on-Plate”

A eficiência de fusão do arame (η_{fa}) pode ser determinada conhecendo os valores do coeficiente de fusão do arame (K_{fa}), da velocidade de alimentação do arame (W), e da potência média do sistema (P_m), mediante a seguinte relação:

$$\eta_{fa} = \left(\frac{I}{K_{fa}} \right) \cdot \frac{W}{P_m} \cdot 100 \quad (\%) \quad [12.23]$$

Aplicando a equação [12.23], para uma condição estável ($W_{fa} = W$), foi calculado cada valor da eficiência de fusão do arame.

A Fig.158 mostra a eficiência de fusão do arame em função da interação da potência média do sistema e da forma de onda, cordão de solda “bead-on-plate”, posição plana. Valores máximos da eficiência de fusão do arame foram obtidos com a forma de onda retangular (A1). Os pontos na Fig.158 indicam os valores médios da eficiência de fusão do arame para cada combinação de tratamento, que, também, podem ser analisados em conjunto com os valores da Tabela 13.

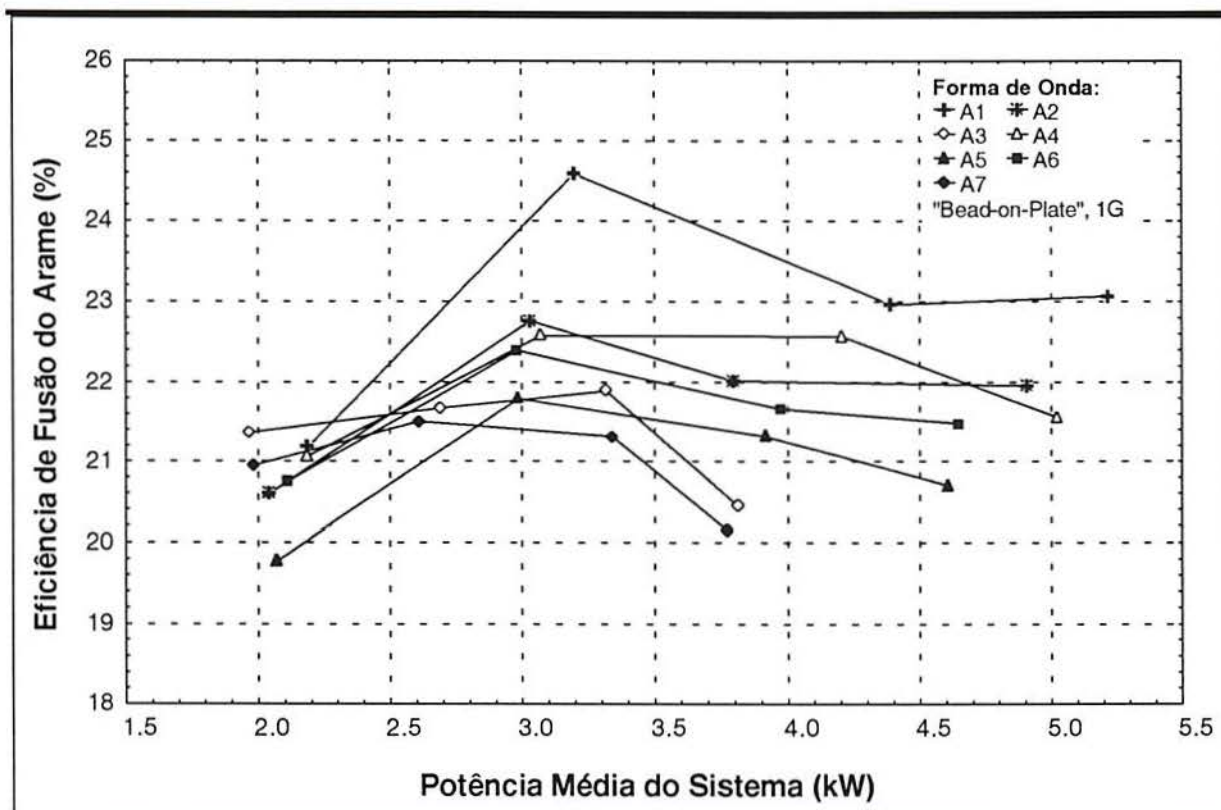


Fig.158: Valores médios da eficiência de fusão do arame em função da potência média do sistema e da forma de onda da tensão de controle, cordão de solda “bead-on-plate”, 1G.

Na Tabela 13 são apresentados os valores da média (%), do desvio padrão (%), e da variância da eficiência de fusão do arame, em função da frequência e forma de onda. Cada valor médio foi obtido de quatro valores de potência média do sistema, que correspondem às quatro leituras de corrente de soldagem e tensão do processo obtidas durante a soldagem.

Os resultados da Tabela 13 mostram que a eficiência de fusão do arame, para a forma de onda retangular ($\eta_{fa} \approx 23\%$) é ligeiramente superior às outras (A2, $\eta_{fa} \approx 21,8\%$; A3, $\eta_{fa} \approx 21,3\%$; A4, $\eta_{fa} \approx 21,9\%$; A5, $\eta_{fa} \approx 20,8\%$; A6, $\eta_{fa} \approx 21,5\%$; A7, $\eta_{fa} \approx 20,9\%$).

Tab.13: Valores da média, do desvio padrão e da variância da eficiência de fusão do arame em função da frequência e forma de onda, cordão de solda “bead-on-plate”, 1G.

Forma de Onda		Eficiência de Fusão do Arame (η_{fa} -%)				
		25 Hz	50 Hz	75 Hz	100 Hz	Média de cada Onda
A1	Média	21,181	24,582	23,216	23,062	23,010
	Desvio Padrão	0,227497	0,224338	0,184971	0,086974	1,61900
	Variância	0,051755	0,050328	0,034214	0,007564	1,592391
A2	Média	20,591	22,757	22,013	21,949	21,827
	Desvio Padrão	0,149156	0,391219	0,079721	0,401006	0,848460
	Variância	0,022248	0,153052	0,006355	0,160805	0,719884
A3	Média	21,362	21,671	21,892	20,437	21,340
	Desvio Padrão	0,122171	0,575618	0,228211	0,421954	0,665962
	Variância	0,014926	0,331336	0,052080	0,178045	0,443505
A4	Média	21,057	22,575	22,571	21,559	21,941
	Desvio Padrão	0,355414	0,203289	0,222425	0,324534	0,724419
	Variância	0,126319	0,041326	0,049473	0,105323	0,524769
A5	Média	19,774	21,793	21,315	20,697	20,895
	Desvio Padrão	0,716181	0,803721	0,420050	0,440454	0,955761
	Variância	0,512915	0,645968	0,176442	0,194000	0,913479
A6	Média	20,746	22,389	21,662	21,481	21,569
	Desvio Padrão	0,739136	0,538529	0,311999	0,101817	0,743885
	Variância	0,546322	0,290013	0,097344	0,010367	0,553365
A7	Média	20,949	21,502	21,313	20,133	20,974
	Desvio Padrão	0,120409	0,674460	0,236194	0,191068	0,637237
	Variância	0,014498	0,454896	0,055788	0,036507	0,406072
Média de cada Frequência	Média	20,808	22,467	21,997	21,331	21,651
	Desvio Padrão	0,622342	1,093476	0,691366	0,989586	1,068948
	Variância	0,387309	1,195689	0,477987	0,979280	1,142651

12.3.2.- Forma de Onda Retangular (A1)

12.3.2.1.- Cordões de Solda em Filete

A Fig.159 mostra a eficiência de fusão do arame (η_{fa}) em função da frequência e da tensão V_{R-p} da forma de onda retangular, cordão de solda em filete, posição plana, observando-se uma interação muito significativa. O valor máximo de η_{fa} foi de 24,65%, para uma $F = 150$ Hz e $V_{R-p} = 8,5$ V. O valor mínimo registrado de η_{fa} foi de 19,87%, para uma $F = 300$ Hz e $V_{R-p} = 7,5$ V. Valores intermediários de η_{fa} foram obtidos para as outras combinações de tratamento, como podem ser observados na Tabela 14.

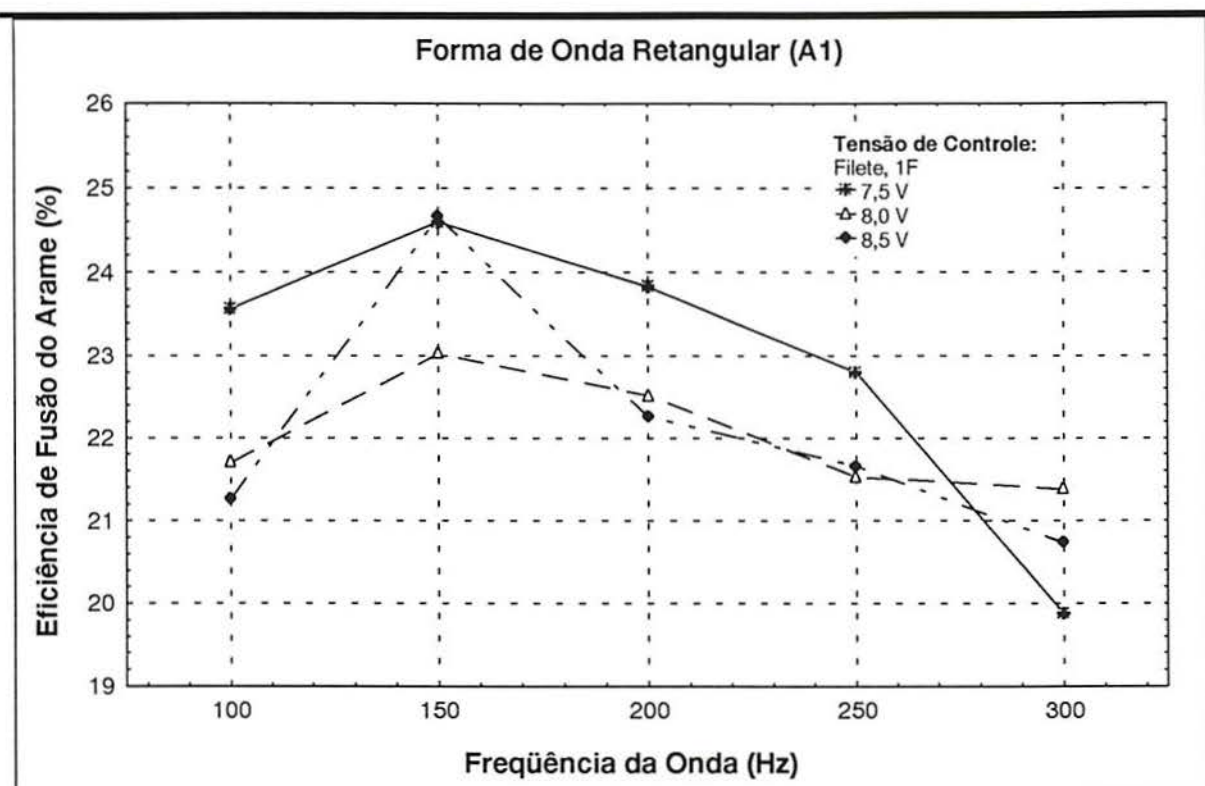


Fig.159: Valores médios da eficiência de fusão do arame em função da frequência e da tensão V_{R-p} da forma de onda retangular, cordão de solda em filete, posição plana.

Tab.14: Valores da média, do desvio padrão e da variância da eficiência de fusão do arame em função da frequência da onda e da tensão de controle de pico, cordão de solda em filete, 1F.

Frequência de Onda (F)		Eficiência de Fusão do Arame ($\eta_{fa} - \%$)			Média de cada Frequência
		Tensão de Controle de Pico (V_{R-p})			
		7,5 V	8,0 V	8,5 V	
100 Hz	Média	23,563	21,695	21,258	22,172
	Desvio Padrão	0,394384	0,366490	0,279312	1,102708
	Variância	0,155539	0,134315	0,078015	1,215964
150 Hz	Média	24,594	23,023	24,651	24,089
	Desvio Padrão	0,380207	0,063929	0,113022	0,825149
	Variância	0,144558	0,004087	0,012774	0,680871
200 Hz	Média	23,827	22,514	22,258	22,867
	Desvio Padrão	0,159996	0,094879	0,124430	0,737501
	Variância	0,025599	0,009002	0,015483	0,543908
250 Hz	Média	22,795	21,521	21,655	21,990
	Desvio Padrão	0,284122	0,176555	0,186208	0,635638
	Variância	0,080725	0,031172	0,034674	0,404035
300 Hz	Média	19,870	21,373	20,730	20,658
	Desvio Padrão	0,051302	0,061124	0,118506	0,656871
	Variância	0,002632	0,003736	0,014044	0,431480
Média de cada tensão de controle	Média	22,930	22,025	22,111	22,355
	Desvio Padrão	1,708949	0,677879	1,420581	1,373946
	Variância	2,920506	0,459520	2,018050	1,887711

12.3.2.2.- Cordões de Solda em Filete vs. “Bead-on-Plate”

A Fig.160 mostra a eficiência de fusão do arame (η_{fa}) em função da potência média do sistema e tensão V_{R-p} , da forma de onda retangular, para as juntas tipo “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F). A configuração da junta utilizada não afetou significativamente a η_{fa} , o valor médio da $\eta_{fa} = 22,52\%$, para a forma de onda retangular.

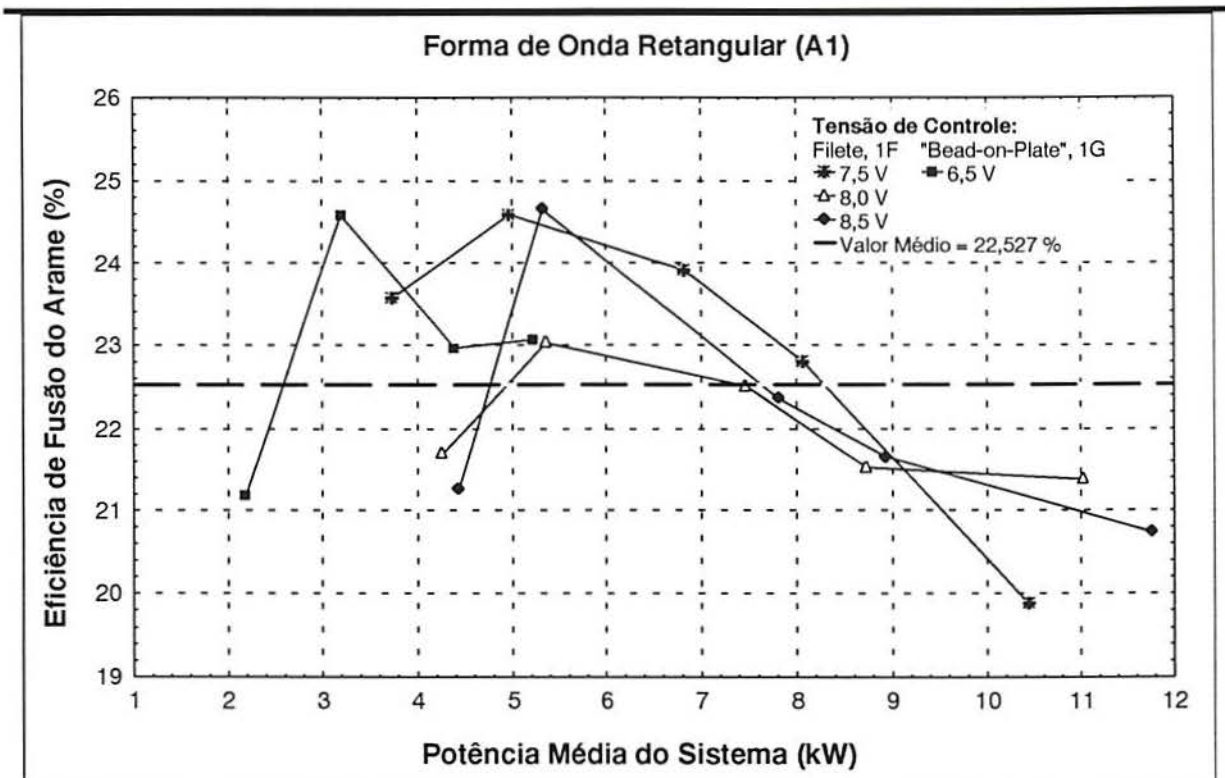


Fig.160: Valores médios da eficiência de fusão do arame em função da potência média do sistema e tensão V_{R-p} da forma de onda retangular, para as juntas tipo “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F).

12.3.3.- Forma de Onda Composta Decrescente (A5)

12.3.3.1.- Cordões de Solda em Filete

A Fig.161 mostra a eficiência de fusão do arame (η_{fa}) em função da frequência e da tensão V_{R-p} da forma de onda composta decrescente, cordão de solda em filete, posição plana. O valor máximo de η_{fa} foi de 24,65%, para uma $F = 100$ Hz e $V_{R-p} = 8,5$ V. O valor mínimo registrado de η_{fa} foi de 21,30%, para uma $F = 150$ Hz e $V_{R-p} = 8,5$ V. Valores intermediários de η_{fa} foram obtidos para as outras combinações de tratamento, como podem ser observados na Tabela 15.

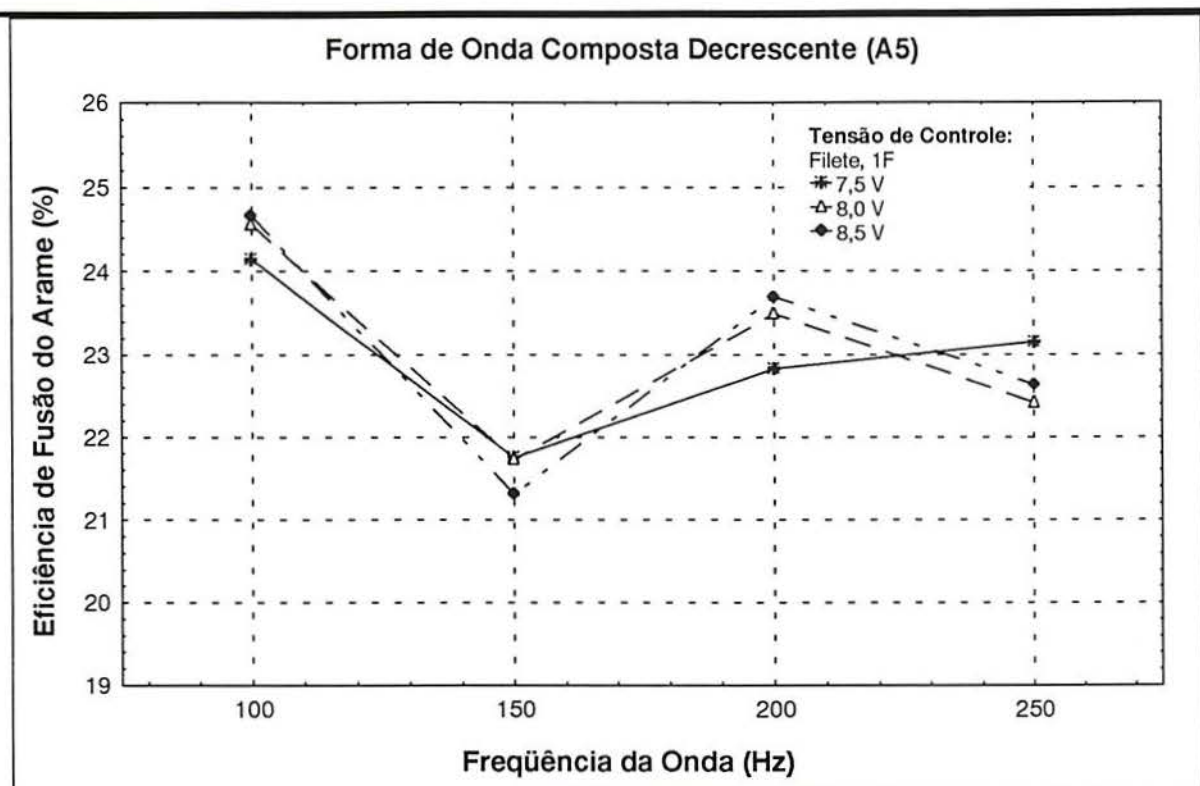


Fig.161: Valores médios da eficiência de fusão do arame em função da frequência e da tensão V_{R-p} da forma de onda composta decrescente, cordão de solda em filete, posição plana.

Tab.15: Valores da média, do desvio padrão e da variância da eficiência de fusão do arame em função da frequência da onda e da tensão de controle de pico, cordão de solda em filete, 1F.

Frequência de Onda (<i>F</i>)		Eficiência de Fusão do Arame (η_{fa} -%)			Média de cada Frequência
		Tensão de Controle de Pico (V_{R-p})			
		7,5 V	8,0 V	8,5 V	
100 Hz	Média	24,143	24,553	24,652	24,449
	Desvio Padrão	0,177924	0,145632	0,436805	0,339747
	Variância	0,031657	0,021209	0,190799	0,115428
150 Hz	Média	21,752	21,729	21,304	21,595
	Desvio Padrão	0,179485	0,349258	0,308578	0,331872
	Variância	0,032215	0,121981	0,095221	0,110139
200 Hz	Média	22,827	23,496	23,695	23,339
	Desvio Padrão	0,334305	0,067674	0,457888	0,486366
	Variância	0,111760	0,004580	0,209662	0,236551
250 Hz	Média	23,155	22,415	22,631	22,734
	Desvio Padrão	0,042535	0,106348	0,060578	0,335620
	Variância	0,001809	0,011310	0,003670	0,112641
Média de cada tensão de controle	Média	22,969	23,048	23,070	23,029
	Desvio Padrão	0,909580	1,133708	1,335278	1,107371
	Variância	0,827336	1,285293	1,782967	1,226271

12.3.3.2.- Cordões de Solda em Filete vs. “Bead-on-Plate”

A Fig.162 mostra a eficiência de fusão do arame (η_{fa}) em função da potência média do sistema e tensão V_{R-p} , da forma de onda composta decrescente, para as juntas tipo “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F). Os valores de η_{fa} , para o cordão de solda “bead-on-plate”, são ligeiramente inferiores em relação aos obtidos para o filete, o que é difícil de ser explicado nesse trabalho.

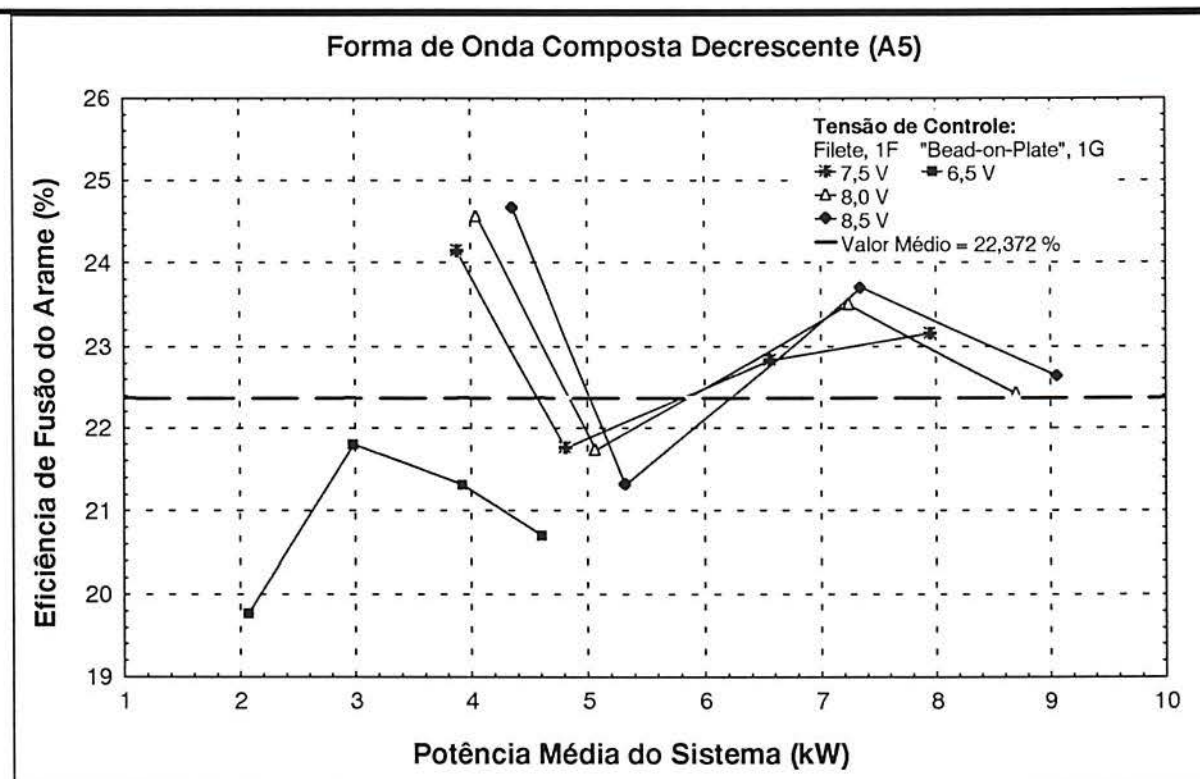


Fig.162: Valores médios da eficiência de fusão do arame em função da potência média do sistema e tensão V_{R-p} da forma de onda composta decrescente, para as juntas tipo “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F).

12.3.4.- Forma de Onda Triangular (A7)

12.3.4.1.- Cordões de Solda em Filete

A Fig.163 mostra a eficiência de fusão do arame (η_{fa}) em função da frequência e da tensão V_{R-p} da forma de onda triangular, cordão de solda em filete, posição plana, observando-se uma interação muito significativa. O valor máximo de η_{fa} foi de 23,14%, para uma $F = 150$ Hz e $V_{R-p} = 8,0$ V. O valor mínimo registrado de η_{fa} foi de 19,82%, para uma frequência de 300 Hz e $V_{R-p} = 8,0$ V. Valores intermediários de η_{fa} foram obtidos para as outras combinações de tratamento, como, também, podem ser observados na Tabela 16.

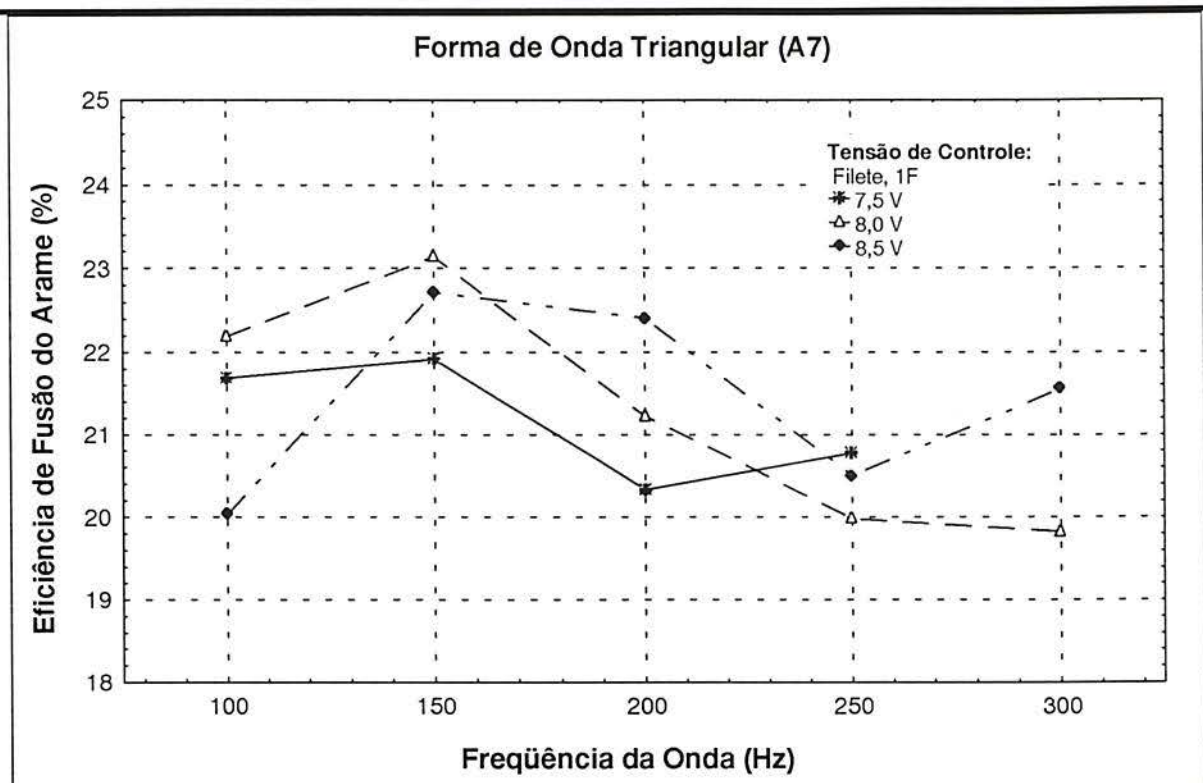


Fig.163: Valores médios da eficiência de fusão do arame em função da frequência e da tensão V_{R-p} da forma de onda triangular, cordão de solda em filete, posição plana.

Tab.16: Valores da média, do desvio padrão e da variância da eficiência de fusão do arame em função da frequência da onda e da tensão de controle de pico, cordão de solda em filete, 1F.

Frequência de Onda		Eficiência de Fusão do Arame (η_{fa} - %)			
		Tensão de Controle de Pico (V_{R-p})			Média de cada Frequência
		7,5 V	8,0 V	8,5 V	
100 Hz	Média	21,689	22,196	20,036	21,307
	Desvio Padrão	0,064039	0,126816	0,419932	1,003350
	Variância	0,004101	0,016082	0,176343	1,006712
150 Hz	Média	21,915	23,136	22,713	22,588
	Desvio Padrão	0,146026	0,200499	0,129513	0,554999
	Variância	0,021324	0,040200	0,016774	0,308024
200 Hz	Média	20,329	21,224	22,411	21,322
	Desvio Padrão	0,295205	0,112397	0,425401	0,942352
	Variância	0,087146	0,012633	0,180966	0,888028
250 Hz	Média	20,774	19,979	20,497	20,417
	Desvio Padrão	0,025580	0,204716	0,022077	0,364161
	Variância	0,000654	0,041909	0,000487	0,132613
300 Hz	Média		19,824	21,561	20,692
	Desvio Padrão		0,114037	0,253002	0,967449
	Variância		0,013004	0,064010	0,935957
Média de cada tensão de controle	Média	21,177	21,272	21,443	21,306
	Desvio Padrão	0,693535	1,324120	1,108193	1,076690
	Variância	0,480991	1,753294	1,228092	1,159281

12.3.4.2.- Cordões de Solda em Filete vs. “Bead-on-Plate”

A Fig.164 mostra a eficiência de fusão do arame (η_{fa}) em função da potência média do sistema e tensão V_{R-p} , da forma de onda triangular, para as juntas tipo “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G,1F). A alteração da configuração da junta, sentido de deslocamento e ângulo da tocha, não afetou significativamente a η_{fa} , valor médio da $\eta_{fa} = 21,09\%$.

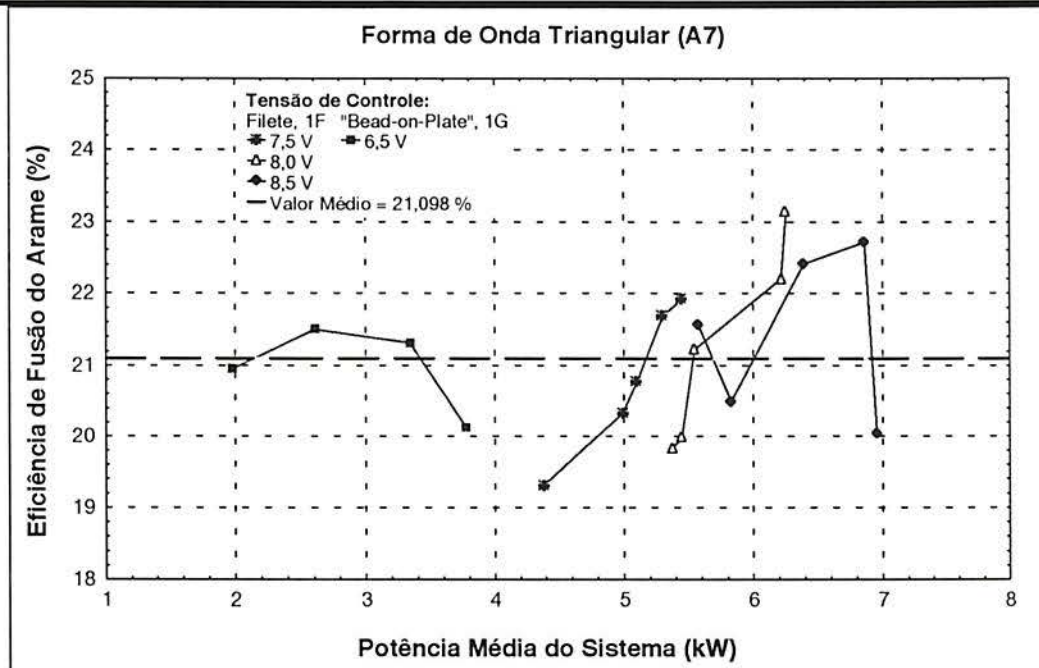


Fig.164: Valores médios da eficiência de fusão do arame em função da potência média do sistema e tensão V_{R-p} da forma de onda triangular, para as juntas tipo “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F).

12.3.5.- Valor Médio da Eficiência de Fusão do Arame para o Processo

Na análise da eficiência de fusão do arame (η_{fa}) no amplo espectro de valores de frequência, potência de pico, potência média do sistema e forma de onda, e outros, não foi possível estabelecer uma relação matemática simples e definida da sua variação. Na continuação se analisa a distribuição da η_{fa} em função da potência média do sistema (P_m), com o objetivo de obter-se um valor médio geral para o processo MIG/MAG pulsado, para as condições estabelecidas nesse trabalho.

A Fig.165 mostra os valores observados e médio geral da eficiência de fusão do arame em função da potência média do sistema, para os cordões de solda “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F). A Fig.166 mostra o histograma de frequência dos valores observados da η_{fa} , no intervalo de 18 a 25%, com valor médio geral de $\eta_{fa} = 21,902\%$ e desvio padrão de 1,2956%.

Uma vez determinado o valor médio geral da eficiência de fusão do arame (η_{fa}), e conhecendo o coeficiente de fusão do arame (K_{fa}), é possível estabelecer uma única relação entre a velocidade de alimentação do arame (W) e a potência média do sistema (P_m), para uma condição estável.

A equação [12.24] de regressão linear explica que um ($R^2 =$) 97,962 % da variabilidade da taxa média de fusão do arame (ou velocidade de alimentação do arame) é devido à variação da potência média do sistema, e tem a seguinte forma:

$$W = 992,476 \cdot 10^{-6} \cdot P_m \quad (\text{m / min}) \quad [12.24]$$

Onde:

P_m = Potência média do sistema, (W);

$$K_{fa} \cdot \eta_{fa} = 992,476 \cdot 10^{-6} \quad (\text{m / (min.W)}) \quad \text{e} \quad K_{fa} = 4,53061 \cdot 10^{-3} \quad (\text{m / (min.W)}) .$$

Nesse trabalho, o valor de K_{fa} foi mantido constante, sendo possível determinar o valor médio da eficiência de fusão do arame, independente da forma de onda utilizada:

$$\eta_{fa} = 21,906 \quad (\%) \quad [12.25]$$

A equação de regressão [12.24] pode ser melhor avaliada mediante a análise de variância (ANOVA), como mostra a Tabela 17. O valor de F_{cal} é superior ao F_{tab} , portanto a relação entre a taxa média de fusão do arame e a potência média do sistema é altamente significativa.

A Fig.167 mostra os valores observados e a reta de regressão linear da taxa média de fusão do arame em função da potência média do sistema, para os cordões de solda “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F).

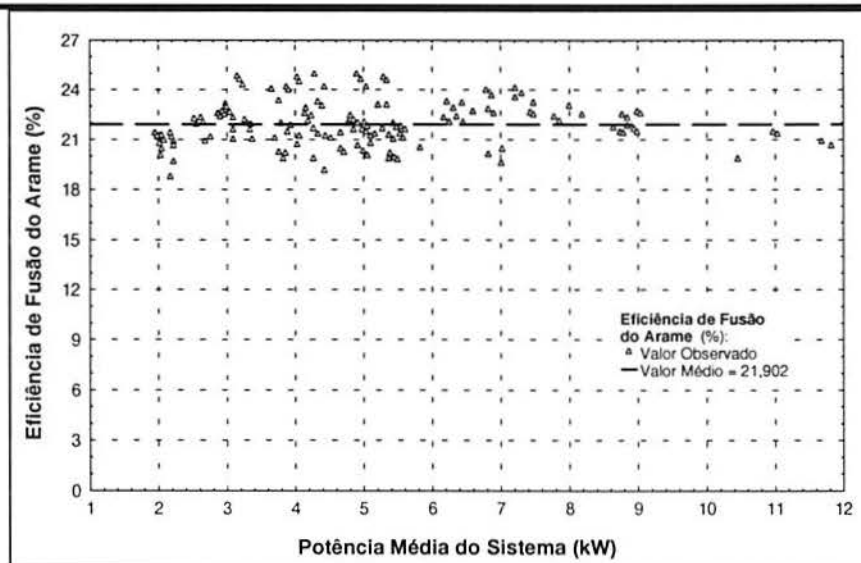


Fig.165: Valores observados e médio geral da eficiência de fusão do arame em função da potência média do sistema, para os cordões de solda “bead-on-plate” e filete, posição plana.

Tab.17: Análise de variância (ANOVA) da equação de regressão linear da taxa média de fusão do arame e a potência média do sistema.

Fonte de Variação	SQ	GDL	MQ	F _{cal}	F _{tab}	Significativo
Equação Regressão	1103,99	1	1103,99	11365,0	> 3,84	Signif.
Resíduo	22,63355	233	0,097139			
Total	1126,6235	234				

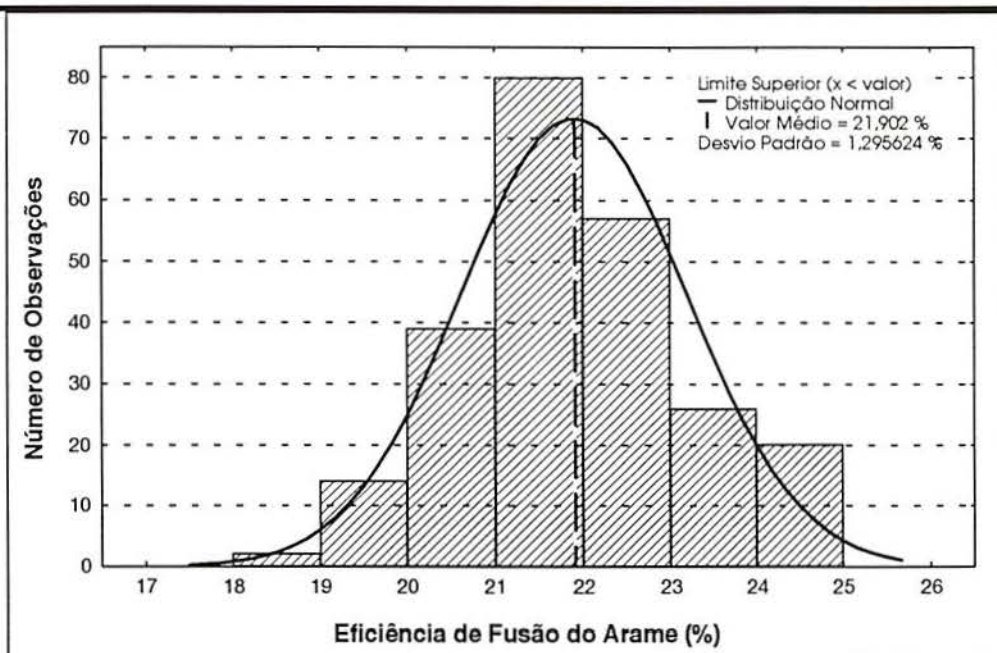


Fig.166: Histograma de frequência dos valores observados e médio geral da eficiência de fusão do arame, para os cordões de solda “bead-on-plate” e filete, posição plana.

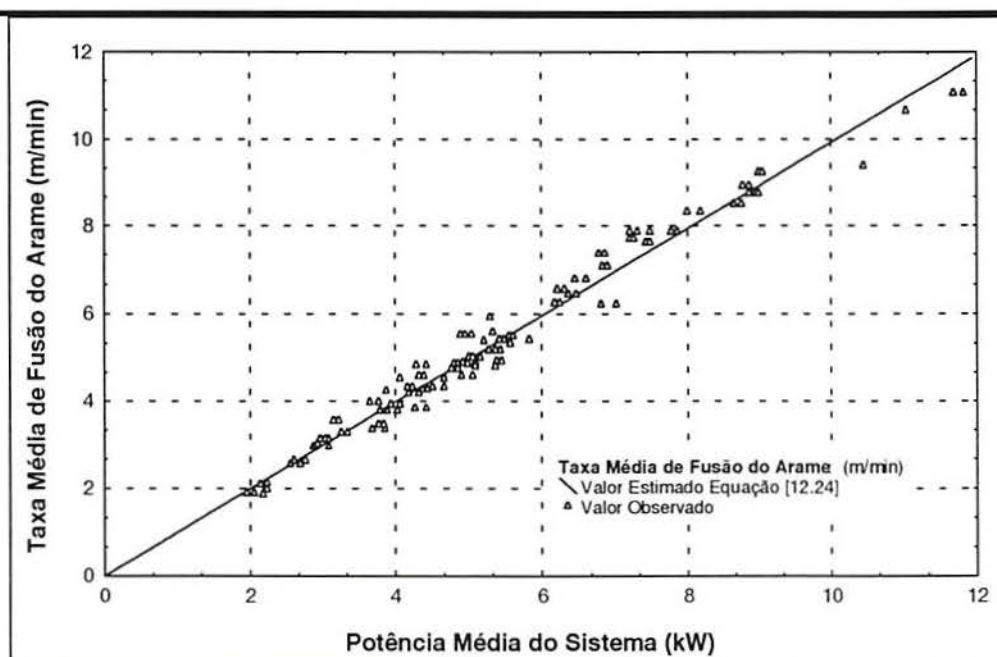


Fig.167: Taxa média de fusão do arame em função da potência média do sistema, para todas as formas de onda utilizadas na realização dos cordões de solda “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F).

12.4.- Área Transversal do Metal de Adição

Nesse trabalho, não se dispõe do valor da eficiência de deposição, mas é possível determinar os valores observados da área transversal do metal de adição (AR) e da taxa média de fusão do arame (ou velocidade de alimentação do arame, W):

$$AR = \eta_d \cdot \frac{V_a}{V_s} = \eta_d \cdot \frac{K_a \cdot A \cdot W}{V_s} \quad (\text{mm}^2) \quad [12.26]$$

A equação [12.27] de regressão linear explica que um ($R^2 =$) 99,051 % da variabilidade da área transversal do metal de adição é devido a taxa média de fusão do arame (ou velocidade de alimentação do arame) e tem a seguinte forma:

$$AR = 4,582495 \cdot W \quad (\text{mm}^2) \quad [12.27]$$

A equação de regressão [12.27] pode ser avaliada mediante a análise de variância (ANOVA), conforme mostra a Tabela 18. O valor de F_{cal} é superior ao F_{tab} , portanto a relação entre a área transversal do metal de adição e a taxa média de fusão é altamente significativa. Na Fig.168, são plotados os valores observados da área transversal do metal de adição e da taxa média de fusão do arame, e a reta de regressão linear da equação [12.27].

Tab.18: Análise de variância (ANOVA) da equação de regressão linear da área transversal do metal de adição em função da taxa média de fusão do arame.

Fonte de Variação	SQ	GDL	MQ	F_{cal}	F_{tab}	Significativo
Equação Regressão	23020,94	1	23020,94	24326,7	> 3,84	Signif.
Resíduo	220,493	233	0,946324			
Total	23241,433	234				

Fica demonstrado que a área transversal do metal de adição não é afetada pelo tipo e espessura da junta de soldagem, ângulo e sentido de deslocamento da tocha.

Comparando-se as equações [12.27] da regressão e [12.26] desenvolvida, obtém-se a seguinte igualdade:

$$\eta_d \cdot \frac{K_a \cdot A}{V_s} = 4,582495 \quad [12.28]$$

Nesse trabalho, os valores do diâmetro do arame (d) e da velocidade de soldagem (V_s) foram mantidos constantes, então, é possível calcular a eficiência de deposição (η_d), a qual tem o seguinte valor:

$$\eta_d = 0,97244 \quad [12.29]$$

Segundo Quintino *et al.* /53/ a eficiência de deposição pode chegar a ser maior do que 1, até 1,06, para o processo MIG/MAG pulsado com arame de aço ao carbono, $d = 1,2$ mm e

Ar + 2% O₂. Concluíram que há ganho de carbono no metal de solda devido ao gás de proteção utilizado, portanto, há um aumento na massa depositada. Porém essa explicação não está aprofundada.

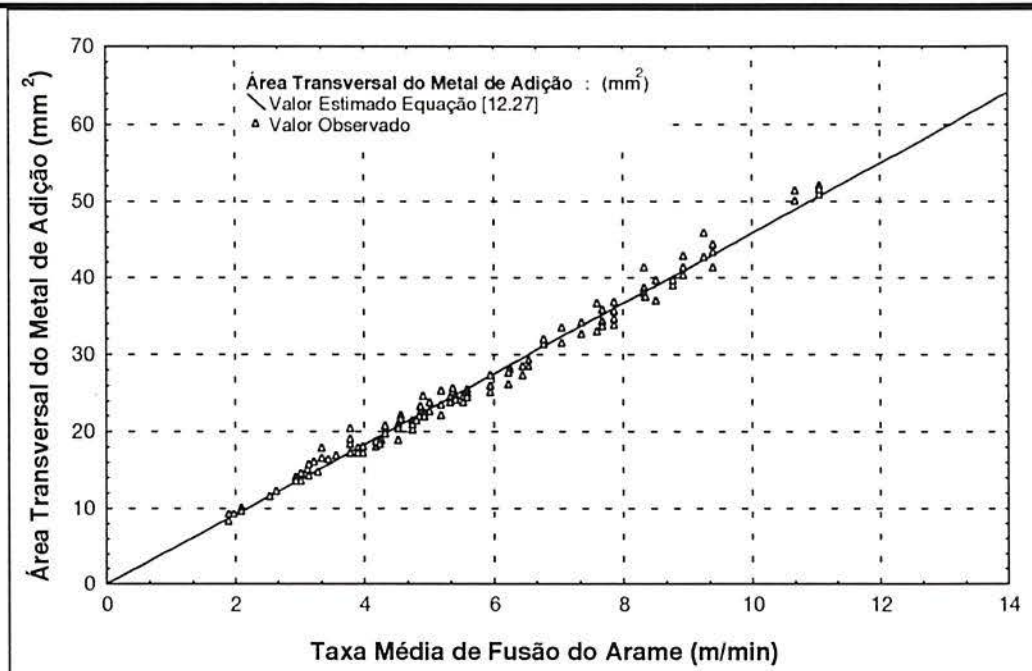


Fig.168: Valores obtidos da área transversal do metal de adição e da taxa média de fusão do arame, e a reta de regressão linear.

12.5.- Efeitos da Energia Média de Soldagem sobre as Eficiências de Fusão

12.5.1.- Cordões de Solda “Bead-on-Plate”

Os valores médios das eficiências de fusão η_p , η_{AB} e η_{AR} , em função da energia média de soldagem, são mostrados nas Figs.169, 170 e 177, respectivamente, para cada forma de onda de tensão de controle (A1, A2, A3, A4, A5, A6 e A7), e cordões de solda “bead-on-plate”, 1G.

Na Fig.169, são plotados os valores da eficiência de fusão do processo (η_p) em função da energia média de soldagem e formas de onda. Quando utilizados baixos valores de energia média de soldagem o efeito da forma de onda não é significativo sobre η_p , ou seja, valores no intervalo de 21 a 24%.

Para um aumento da energia média de soldagem, o efeito da forma de onda sobre a eficiência de fusão do processo (η_p) passa a ser importante. Observando-se valores de η_p maiores para a forma de onda retangular (A1), verifica-se que para um incremento na energia média de soldagem corresponde um aumento em relação às outras formas de onda (A2, A3, A4, A5, A6 e A7), no valor da energia utilizada para fundir o arame e metal base. Entretanto, para as formas de

onda A3 e A7 os valores obtidos de η_p foram menores, o que pode ser devido ao aumento da perda de calor na coluna do arco, ou no metal base devido à condução, já que o tempo que a potência demora para passar do valor base (P_b) ao valor pico (P_p), é maior se comparado à forma de onda retangular (A1). Valores intermediários de η_p foram obtidos para as formas de onda A2, A4, A5 e A6. Por exemplo, para cada forma de onda e mantendo-se constante $\delta E_a = 0,9$ kJ/mm, A1 a $\eta_p \approx 33$ %; A2 a $\eta_p \approx 31$ %; A3 a $\eta_p \approx 26,3$ %; A4 a $\eta_p \approx 31$ %; A5 a $\eta_p \approx 28,5$ %; A6 a $\eta_p \approx 28$ %; A7 a $\eta_p \approx 26,3$ %.

Na Fig.170, são plotados os valores da eficiência de fusão do metal base (η_{AB}) em função da energia média de soldagem e formas de onda. Quando utilizados baixos valores de energia média de soldagem o efeito da forma não é significativo sobre η_{AB} , que apresenta valores no intervalo de 2,4 a 3,8%. Para um incremento no valor da energia média de soldagem corresponde um aumento no valor da η_{AB} , significando que mais energia é transferida e utilizada pelo metal base, para realizar a fusão do mesmo. Onde o valor máximo de $\eta_{AB} = 10$ % foi obtido uma energia de 1,3 kJ/mm e forma de onda retangular. Utilizando-se a forma de onda retangular e valores de energia maior a 0,6 kJ/mm, o valor da η_{AB} é superior em relação às outras formas de onda (A2, A3, A4, A5, A6 e A7). Por exemplo, para cada forma de onda e mantendo-se constante $\delta E_a = 0,9$ kJ/mm, A1 a $\eta_{AB} \approx 8,8$ %; A2 a $\eta_{AB} \approx 7,6$ %; A3 a $\eta_{AB} \approx 5,6$ %; A4 a $\eta_{AB} \approx 8,1$ %; A5 a $\eta_{AB} \approx 7$ %; A6 a $\eta_{AB} \approx 6,6$ %; A7 a $\eta_{AB} \approx 4,9$ %.

Na Fig.171, são plotados os valores da eficiência de fusão do consumível ($\eta_{AR} = \eta_a \cdot \eta_{fa}$) em função da energia média de soldagem e formas de onda. O resultado da eficiência de fusão do consumível está intimamente relacionada à eficiência de fusão do arame (anteriormente analisado).

A seguir são apresentados valores das eficiências de fusão do processo e metal base, obtidos da literatura, quando utilizado o processo MIG/MAG pulsado com forma de onda retangular (A1) e outros processos de soldagem.

Utilizando-se a forma de onda retangular (A1), os valores máximos das eficiências de fusão do processo e metal base, para uma energia média de soldagem de 1,3 kJ/mm, foram de 33% e 10%, respectivamente. Os valores observados foram ligeiramente superiores aos obtidos por Allum e Quintino /57/, que são, para η_p de 30%, e η_{AB} de 3 a 8%.

Para o processo MIG/MAG convencional, os valores das eficiências de fusão do processo e metal base foram obtidas por Chandel /85/, que são, η_p de 16 a 46%, e η_{AB} de 10 a 30%. O valor máximo da eficiência de fusão do processo calculado por Wells /90/, para o processo

TIG autógeno, supondo uma fonte linear, foi de 40%. No entanto, Swift-Hooke e Gick /91/, supondo uma fonte pontual determinaram η_p de 37%.

Segundo os valores obtidos da eficiência de fusão, observa-se que, do valor total da energia média de soldagem, somente uma parcela é utilizada para fundir o arame e o metal base. O restante da energia se perde na forma de calor de radiação e condução do arco elétrico, e também no salpico (se houver) durante a soldagem. Do total de energia que ingressa no metal base, uma quantidade se perde por condução, convecção e absorção de calor para formar a zona afetada pelo calor (ZAC).

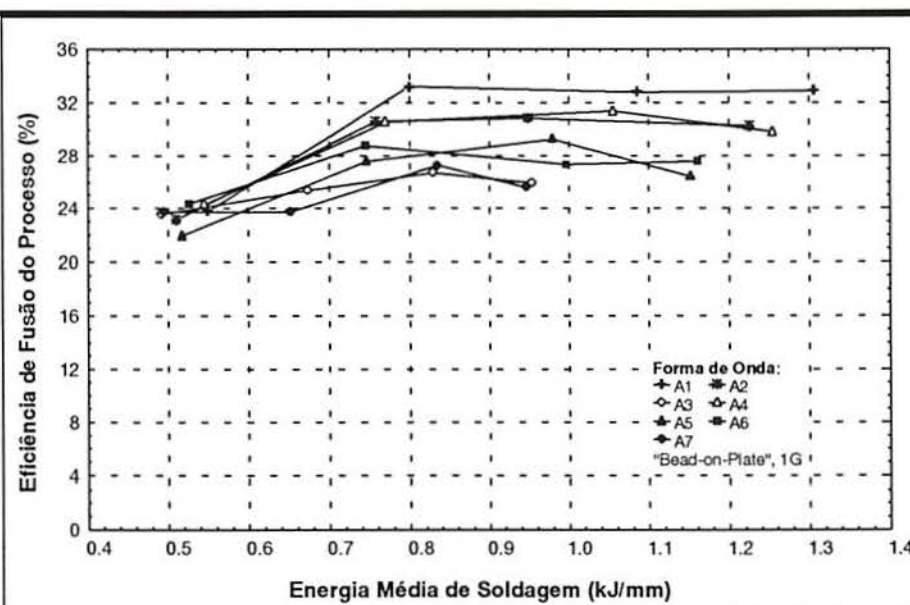


Fig.169: Valores médios da eficiência de fusão do processo em função da energia média de soldagem e da forma de onda da tensão de controle, junta "bead-on-plate", posição plana.

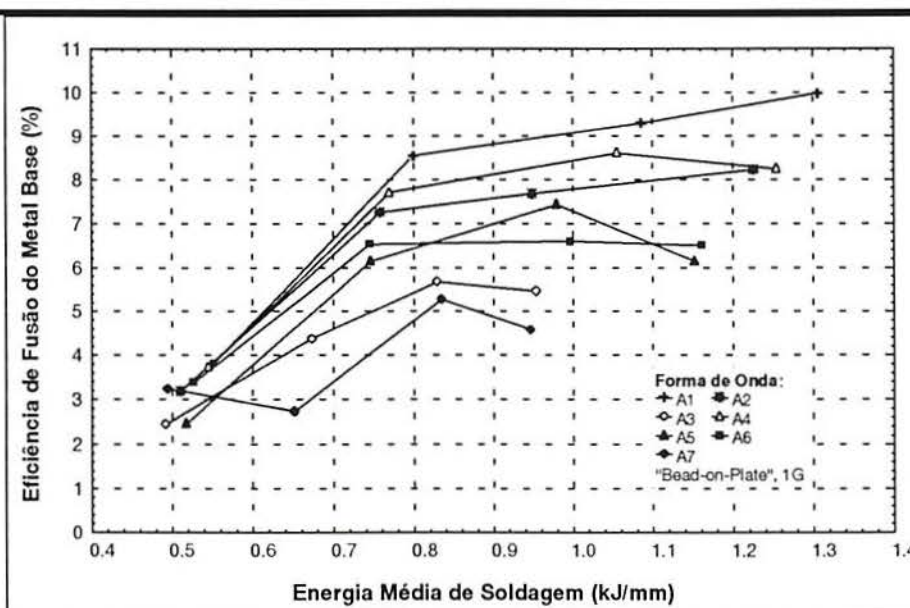


Fig.170: Valores médios da eficiência de fusão do metal base em função da energia média de soldagem e da forma de onda da tensão de controle, junta "bead-on-plate", posição plana.

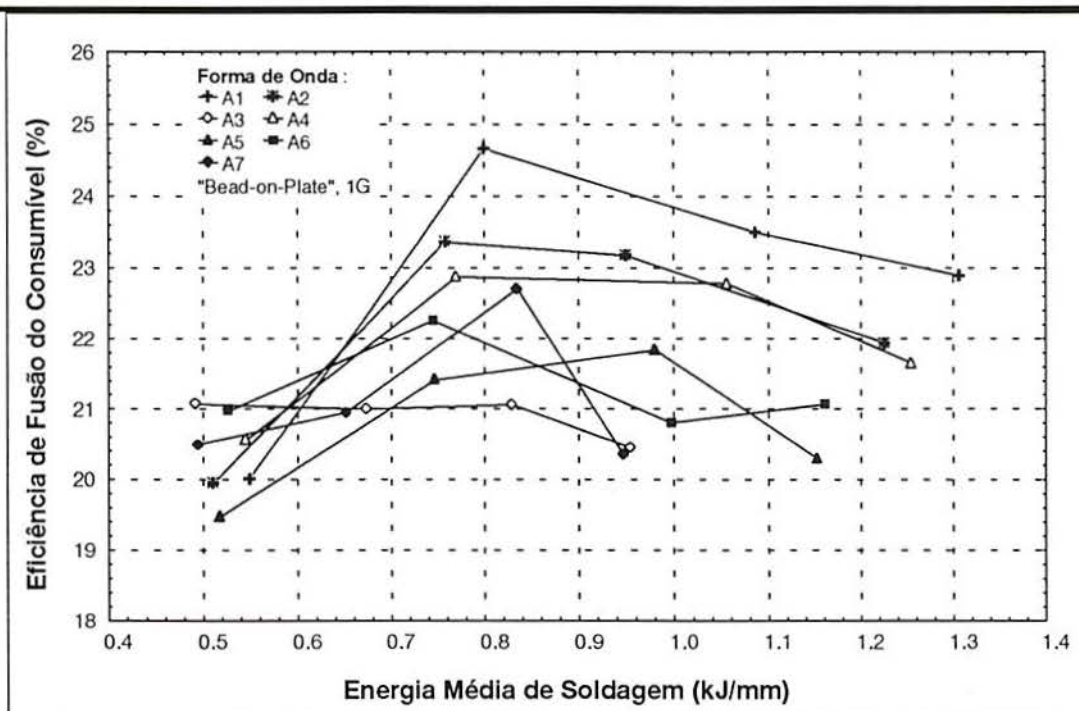


Fig.171: Valores médios da eficiência de fusão do consumível em função da energia média de soldagem e da forma de onda da tensão de controle, junta “bead-on-plate”, posição plana.

12.5.2.- Forma de Onda Retangular (A1)

A Fig.172 mostra os valores médios da eficiência de fusão do metal base (η_{AB}) em função da energia média de soldagem (δE_a), cordões de solda “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F), e forma de onda retangular. Dessa figura, mantendo-se constante a $\delta E_a = 1,2$ kJ/mm, se obtém a $\eta_{AB} \approx 9,6\%$, para o cordão de solda “bead-on-plate” e $V_{R-p} = 6,5$ V, e, para o cordão de solda em filete e $V_{R-p} = 8,5$ V, a $\eta_{AB} \approx 4,5\%$.

O valor máximo de $\eta_{AB} \approx 10\%$ é obtido para $\delta E_a \approx 1,3$ kJ/mm e cordões de solda “bead-on-plate”. No entanto, para o cordão de solda em filete, se obtém o valor máximo de $\eta_{AB} \approx 9,8\%$, para $\delta E_a \approx 2,8$ kJ/mm.

Na Fig.173, são plotados os valores da eficiência de fusão do consumível ($\eta_{AR} = \eta_d \cdot \eta_{fa}$) em função da energia média de soldagem, cordões de solda “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F), e forma de onda retangular. O resultado da eficiência de fusão do consumível está intimamente relacionada à eficiência de fusão do arame (anteriormente analisado).

A Fig.174 mostra os valores médios da eficiência de fusão do processo (η_p) em função da energia média de soldagem (δE_a), cordões de solda “bead-on-plate” e filete, posição plana

(1G, 1F), e forma de onda retangular. O intervalo de valores observados da η_p foi de 24 a 32%, para a junta filete. Foi observado o efeito da junta sobre os valores da η_p devido ao efeito sobre a η_{AB} .

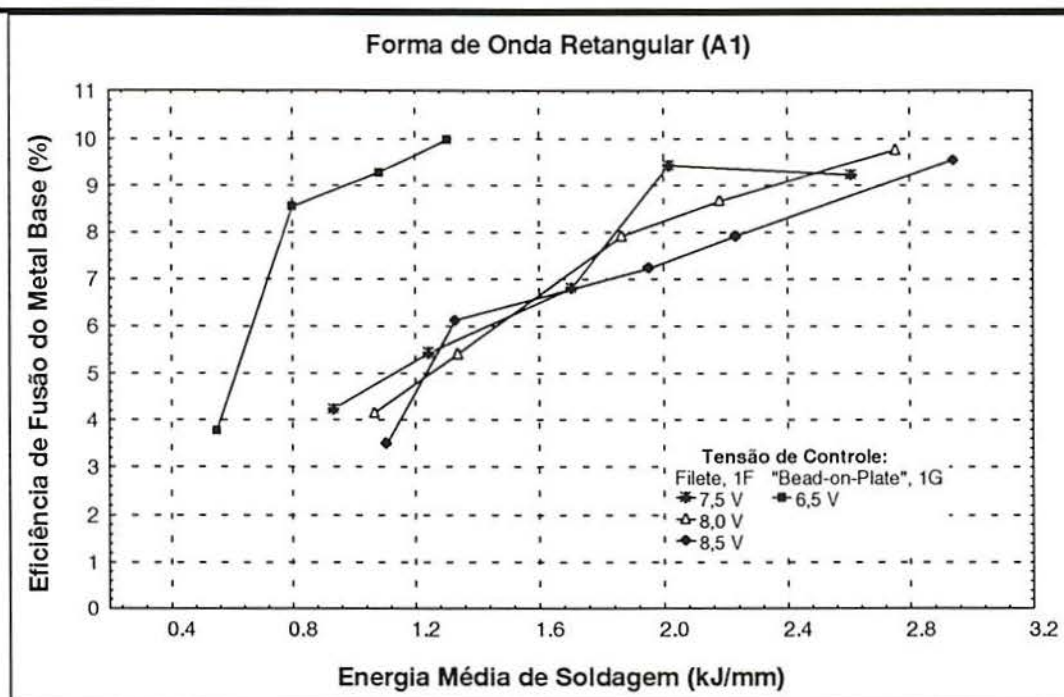


Fig.172: Valores médios da eficiência de fusão do metal base em função da energia média de soldagem, para as juntas tipo "bead-on-plate" e filete, posição plana (1G, 1F), forma de onda retangular (A1).

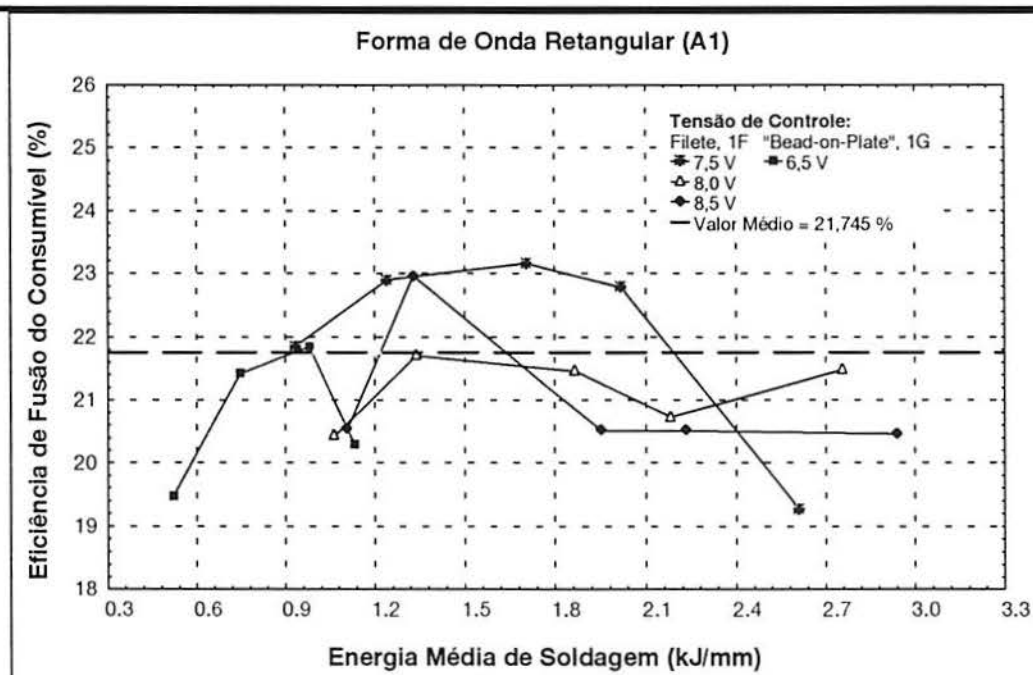


Fig.173: Valores médios da eficiência de fusão do consumível em função da energia média de soldagem, para as juntas tipo "bead-on-plate" e filete, posição plana (1G, 1F), forma de onda retangular (A1).

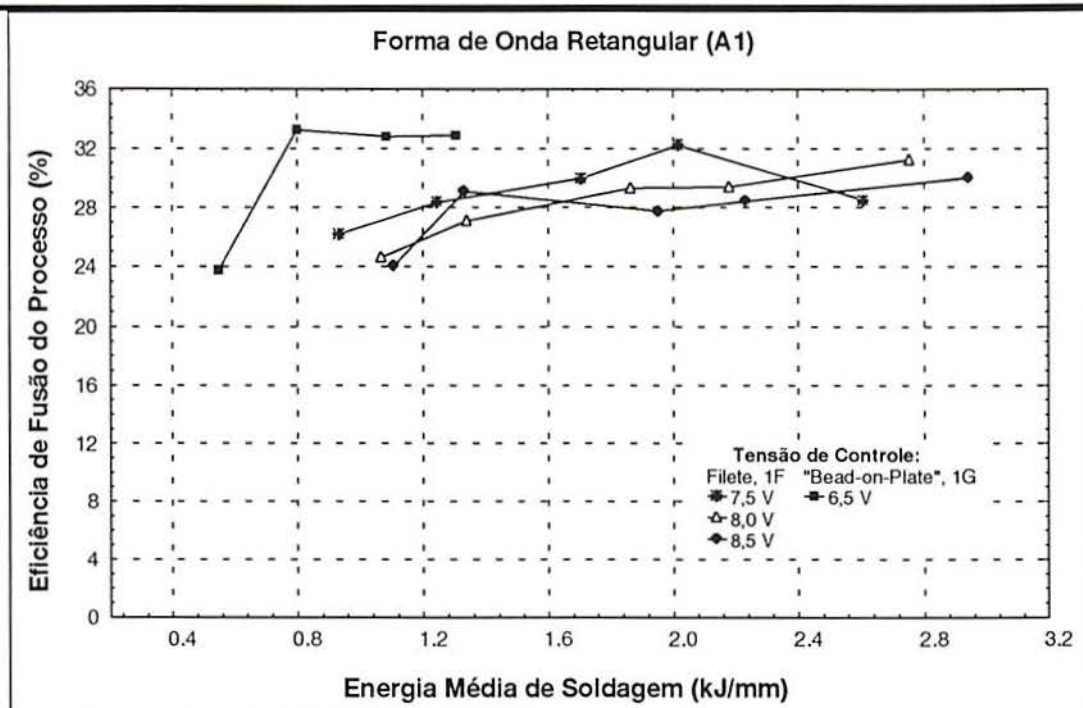


Fig.174: Valores médios da eficiência de fusão do processo em função da energia média de soldagem, para as juntas tipo “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F), forma de onda retangular (A1).

12.5.3.- Forma de Onda Composta Decrescente (A5)

A Fig.175 mostra os valores médios da eficiência de fusão do metal base (η_{AB}) em função da energia média de soldagem (δE_a), cordões de solda “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F), e forma de onda composta decrescente. Dessa figura, mantendo constante a $\delta E_a = 1,0$ kJ/mm, se obtém a $\eta_{AB} \approx 7,4\%$, para o cordão de solda “bead-on-plate” e $V_{R-p} = 6,5$ V, e, para o cordão de solda em filete e $V_{R-p} = 8,0$ V, a $\eta_{AB} \approx 4,4\%$.

O valor máximo da $\eta_{AB} \approx 7,4\%$ é obtido para $\delta E_a \approx 1,0$ kJ/mm, e cordões de solda “bead-on-plate”. No entanto, para o cordão de solda em filete, se obtém o valor máximo de $\eta_{AB} \approx 8,3\%$, para $\delta E_a \approx 2,0$ kJ/mm.

Na Fig.176, são plotados os valores médios da eficiência de fusão do consumível ($\eta_{AR} = \eta_d \cdot \eta_{fa}$) em função da energia média de soldagem, cordões de solda “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F), e forma de onda composta decrescente. O resultado da eficiência de fusão do consumível está intimamente relacionada à eficiência de fusão do arame (anteriormente analisado).

A Fig.177 mostra os valores médios da eficiência de fusão do processo (η_p) em função da energia média de soldagem (δE_a), cordões de solda “bead-on-plate” e filete, posição plana

(1G, 1F), e forma de onda composta decrescente. O intervalo de valores observados da η_p foi de 25 a 31%, para a junta tipo filete. Foi observado o efeito da junta sobre os valores da η_p devido ao efeito sobre a η_{AB} .

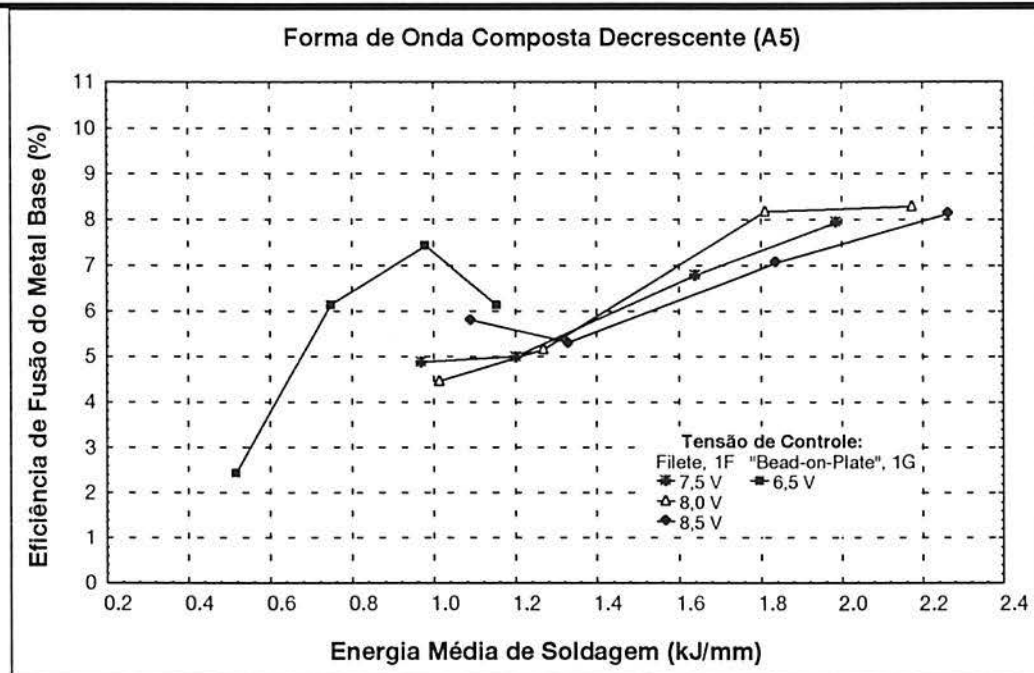


Fig.175: Valores médios da eficiência de fusão do metal base em função da energia média de soldagem, para as juntas tipo “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F), forma de onda composta decrescente (A5).

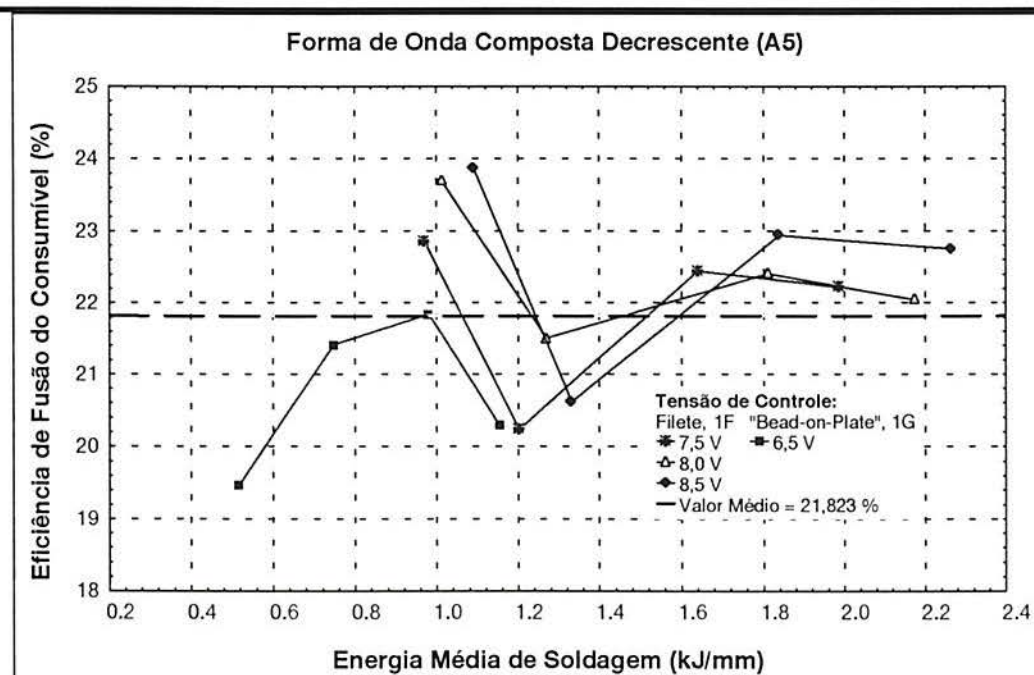


Fig.176: Valores médios da eficiência de fusão do consumível em função da energia média de soldagem, para as juntas tipo “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F), forma de onda composta decrescente (A5).

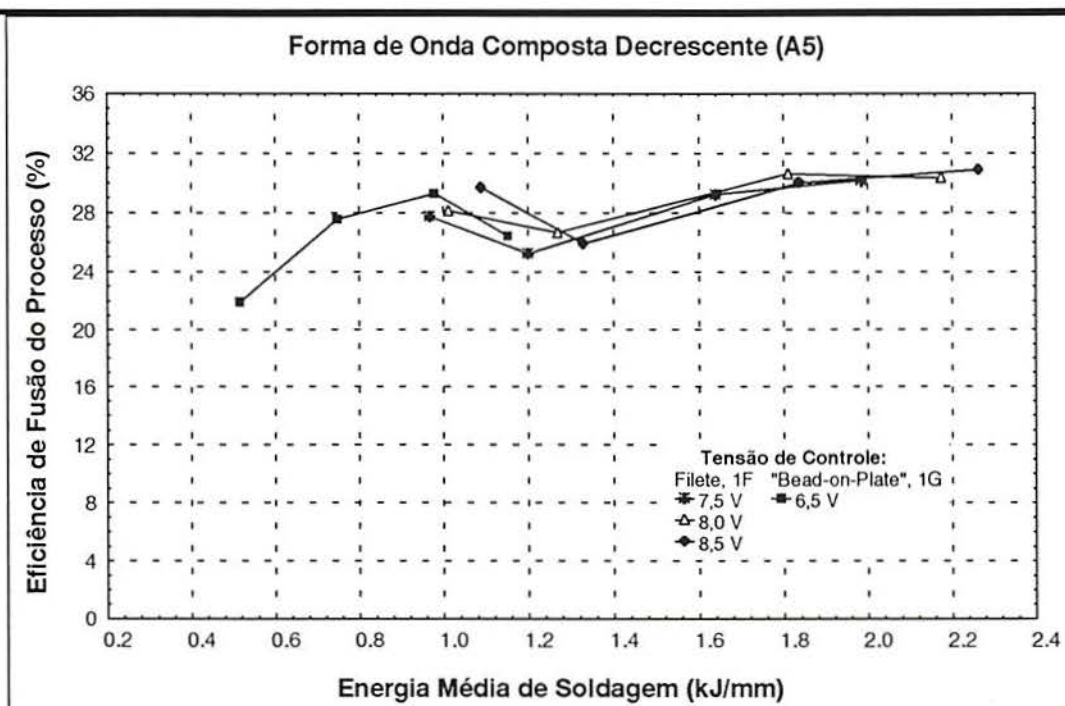


Fig.177: Valores médios da eficiência de fusão do processo em função da energia média de soldagem, para as juntas tipo “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F), forma de onda composta decrescente (A5).

12.5.4.- Forma de Onda Triangular (A7)

A Fig.178 mostra os valores médios da eficiência de fusão do metal base (η_{AB}) em função da energia média de soldagem (δE_a), cordões de solda “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F), e forma de onda triangular (A7).

O valor máximo da $\eta_{AB} = 5,3\%$ é obtida para $\delta E_a = 0,83$ kJ/mm, e cordões de solda “bead-on-plate”. No entanto, para o cordão de solda em filete, se obtém o valor máximo da $\eta_{AB} \approx 7,7\%$, para $\delta E_a \approx 1,7$ kJ/mm.

O valor mínimo da $\eta_{AB} = 2,7\%$ é obtida para $\delta E_a = 0,65$ kJ/mm, e cordões de solda “bead-on-plate”. No entanto, para o cordão de solda em filete, se obtém o valor mínimo da $\eta_{AB} = 3,3\%$, para $\delta E_a = 1,25$ kJ/mm.

Na Fig.179, são plotados os valores médios da eficiência de fusão do consumível ($\eta_{AR} = \eta_d \cdot \eta_{fa}$) em função da energia média de soldagem, cordões de solda “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F), e forma de onda triangular. O resultado da η_{AR} está intimamente relacionada à eficiência de fusão do arame (anteriormente analisado).

A Fig.180 mostra os valores médios da eficiência de fusão do processo (η_p) em função da energia média de soldagem (δE_a), cordões de solda “bead-on-plate” e filete, posição plana

(1G, 1F), e forma de onda triangular. O intervalo de valores observados da η_p foi de 24 a 29,5%, para a junta filete. Foi observado o efeito da junta sobre os valores da η_p devido ao efeito sobre a η_{AB} . O intervalo de valores observados da η_p foi de 24 a 27,3%, para os cordões de solda “bead-on-plate”.

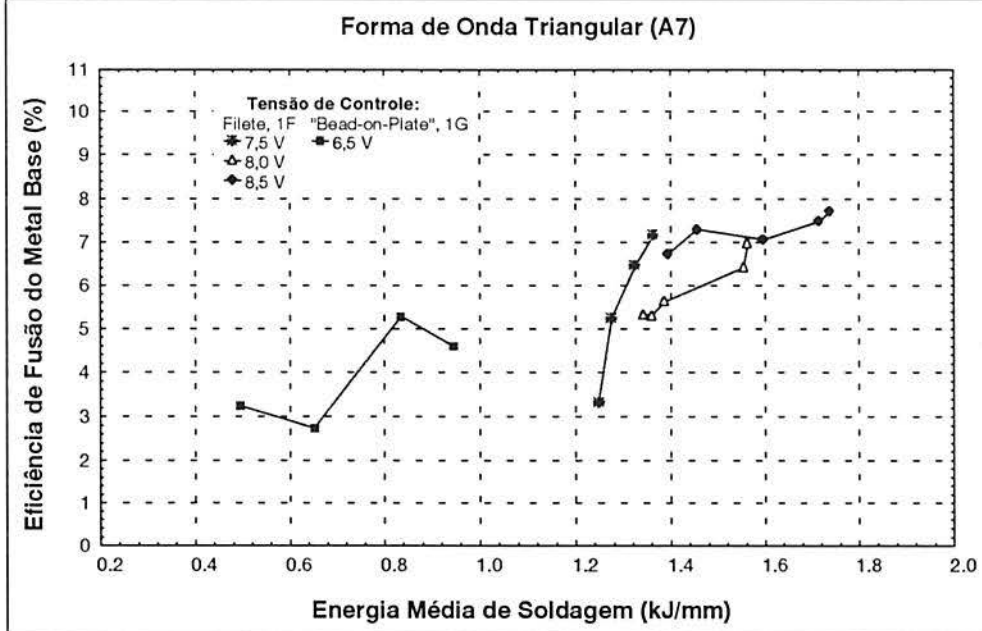


Fig.178: Valores médios da eficiência de fusão do metal base em função da energia média de soldagem, para as juntas tipo “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F), forma de onda triangular (A7).

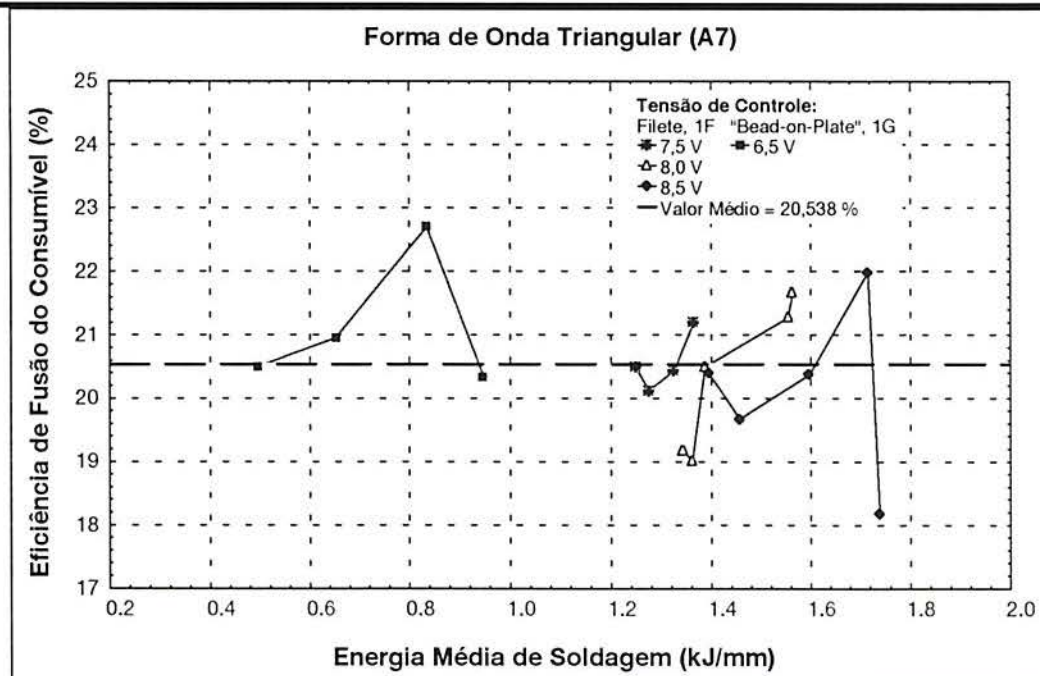


Fig.179: Valores médios da eficiência de fusão do consumível em função da energia média de soldagem, para as juntas tipo “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F), forma de onda triangular (A7).

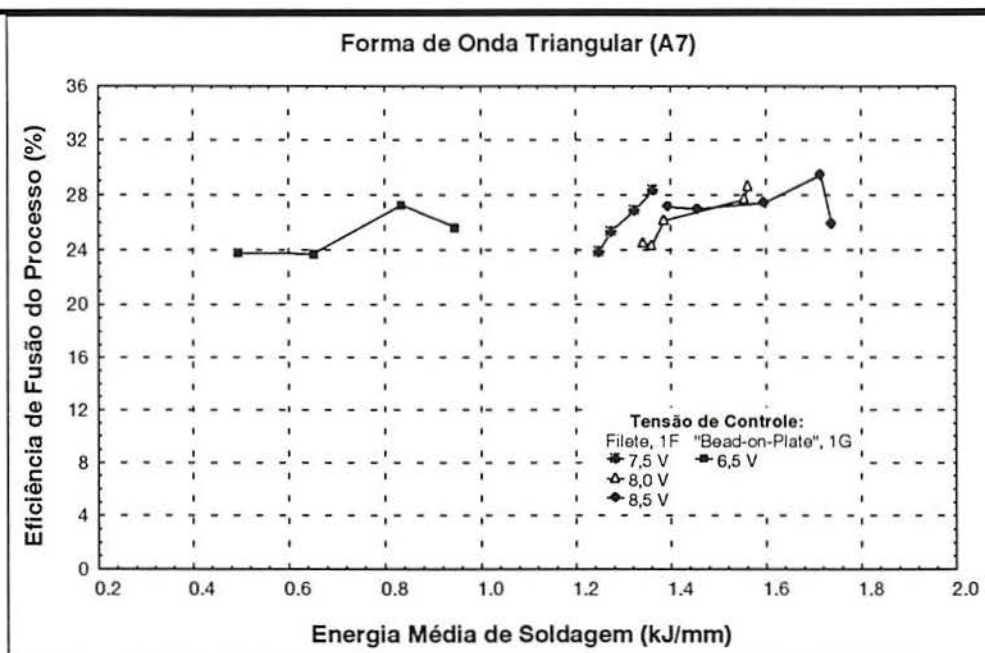


Fig.180: Valores médios da eficiência de fusão do processo em função da energia média de soldagem, para as juntas tipo “bead-on-plate” e filete, posição plana (1G, 1F), forma de onda triangular (A7).

12.6.- Considerações Finais das Eficiências de Fusão

Os parâmetros mantidos constantes na determinação da eficiência de fusão do metal base (η_{AB}) foram:

- .- Processo de soldagem;
- .- Velocidade de soldagem (V_s), diretamente proporcional;
- .- Tipo, diâmetro, e composição do arame e do gás de proteção;
- .- Propriedades físicas do metal base, (h_{mb}).

Os resultados obtidos da eficiência de fusão do metal base mostram que depende de:

- .- Potência média do sistema (P_m), inversamente proporcional;
- .- Dimensões do metal base e da configuração da junta;
- .- A forma da onda.

Os resultados experimentais obtidos mostram que as variáveis principais do processo exercem influência significativa sobre as eficiências de fusão do arame (η_{fa}) e metal base (η_{AB}). Nas fórmulas das eficiências η_{fa} , η_{AB} , η_{AR} e η_p desenvolvidas e apresentadas no Cap.9, para o processo MIG/MAG pulsado não foram considerados os mecanismos de fusão. O mecanismo de fusão do metal base é muito complicado, e ainda não há teoria bem definida a respeito, portanto, não é totalmente entendido, apesar de serem três os fatores principais que afetam a fusão, os quais são:

- 1.- Calor gerado nas regiões ânodo/cátodo;
- 2.- Calor gerado no plasma ou coluna;
- 3.- Superaquecimento do metal fundido e destacado do arame.

12.7.- Diluição

A composição química do metal de solda não é a mesma que a especificada para o metal de adição depositado, devido à participação do metal base na constituição da zona fundida. E essa participação é quantificada mediante a diluição (D , %), que é definida pela relação entre a área fundida do metal base (AB , mm²) e o total de área fundida ($AR+AB$, mm²):

$$D = \frac{AB}{AR + AB} \cdot 100 \quad (\%) \quad [12.30]$$

A partir das equações de eficiências de fusão do consumível e do metal base é possível determinar as áreas de fusão do metal base e total fundida:

$$\eta_{AR} = \eta_{fa} \cdot \eta_d = \frac{h_a \cdot V_s \cdot (AR)}{P_m} \cdot 100 \quad (\%) \quad [12.31]$$

$$\eta_{AB} = \frac{h_{mb} \cdot V_s \cdot (AB)}{P_m} \cdot 100 \quad (\%) \quad [12.32]$$

Substituindo as equações [12.31] e [12.32] na equação [12.30], se tem a diluição em função das eficiências de fusão do metal base e do consumível, dado por:

$$D = \frac{\eta_{AB}}{\eta_{AB} + \eta_{AR}} \cdot 100 = \frac{I}{I + \eta_{AR} / \eta_{AB}} \cdot 100 \quad (\%) \quad [12.33]$$

A equação [12.33] mostra que a diluição é função das eficiências de fusão do metal base e do consumível, portanto, depende de três fatores principais, que são:

- 1.- Potência média do sistema;
- 2.- Velocidade de soldagem;
- 3.- Propriedades físicas do metal base e arame.

Analisando a equação [12.33] tem-se quatro situações possíveis, que são:

$$1.- \eta_{AB} = 0 \quad \Rightarrow \quad D = 0 \quad (\%)$$

O valor da diluição pode ser igual a zero, se a energia média de soldagem não for suficiente para fundir o metal base.

$$2.- \eta_{AR} > \eta_{AB} \quad \Rightarrow \quad D < 50 \quad (\%)$$

A Fig.181 mostra que mantendo-se a energia média de soldagem (δE_a) constante em $\approx 0,9$ kJ/mm, cordões de solda “bead-on-plate”, posição plana, obteve-se o valor máximo da diluição ($\approx 26\%$) para a forma de onda retangular, e o valor mínimo $D \approx 19\%$, para a forma de onda triangular. Valores intermediários foram obtidos para as outras formas de onda (A2, A3, A4, A5 e A6).

O valor da diluição menor que 50%, para os valores observados das eficiência de fusão do consumível e metal base, o valor máximo da diluição foi de $\approx 33\%$, para o cordão de solda em filete e a forma de onda retangular, energia média de soldagem de $\approx 2,6$ kJ/mm, conforme mostra a Fig.182. Valores inferiores a 33% foram obtidos para as outras formas de onda e juntas utilizadas, como mostra as Figs.182-184.

$$3.- \eta_{AR} = \eta_{AB} \Rightarrow D = 50 (\%)$$

Nenhum valor da eficiência de fusão do metal base foi próximo ao do consumível, nessa experiência, portanto, na prática é difícil de acontecer.

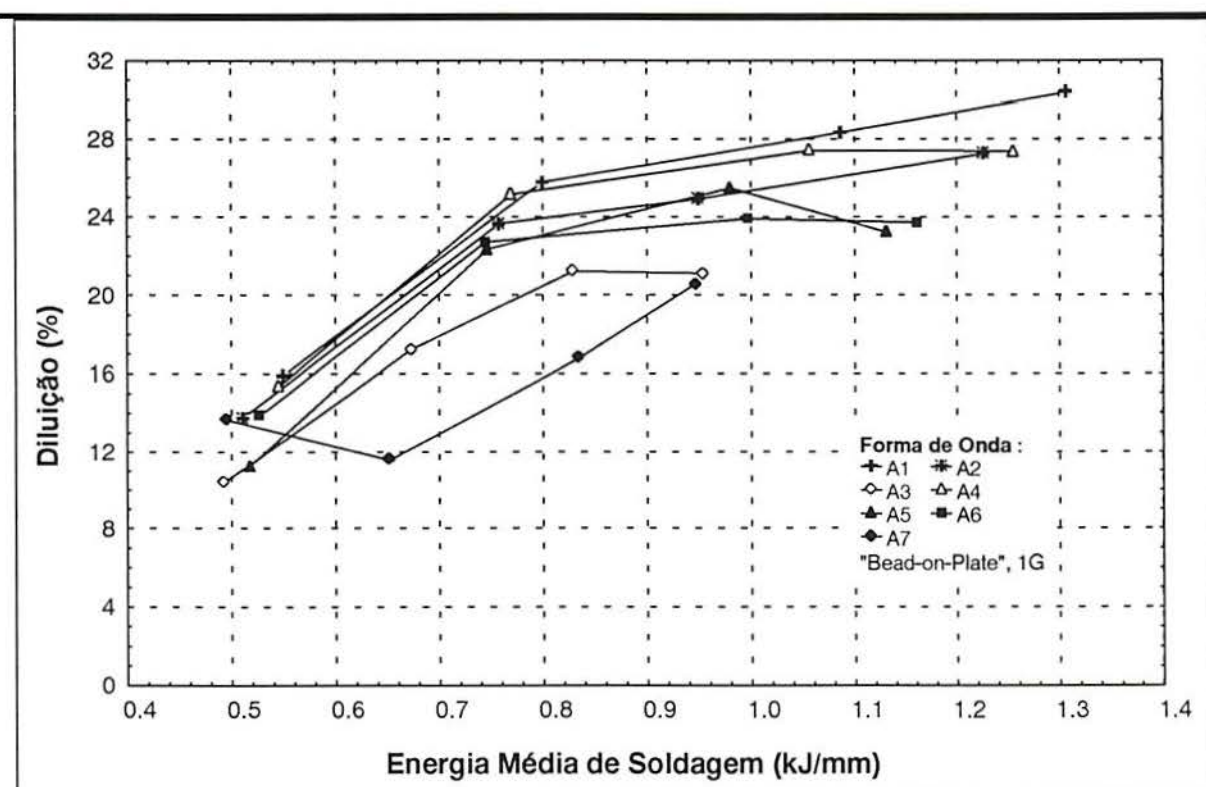


Fig.181: Valores médios da diluição em função da energia média de soldagem e da forma de onda da tensão de controle, cordão de solda “bead-on-plate”, posição plana (1G).

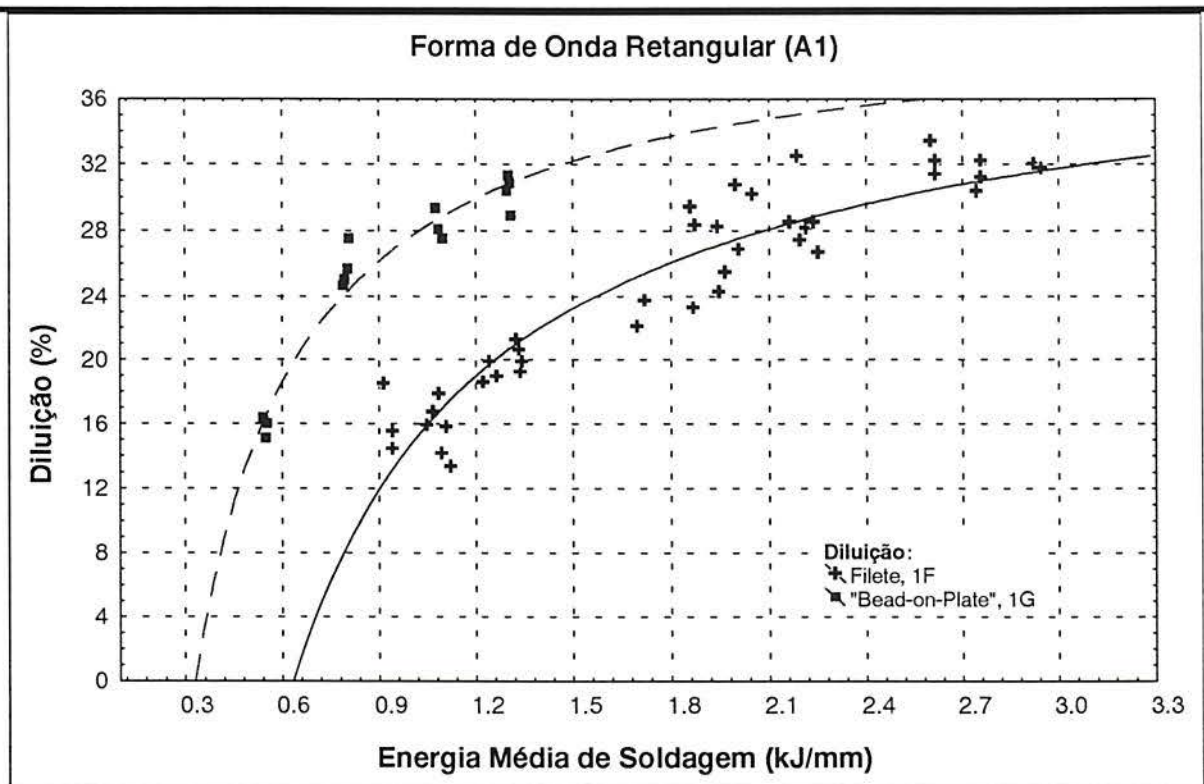


Fig.182: Efeito da energia média de soldagem sobre a diluição, para as juntas tipo "bead-on-plate" e filete, posição plana (1G, 1F), forma de onda retangular.

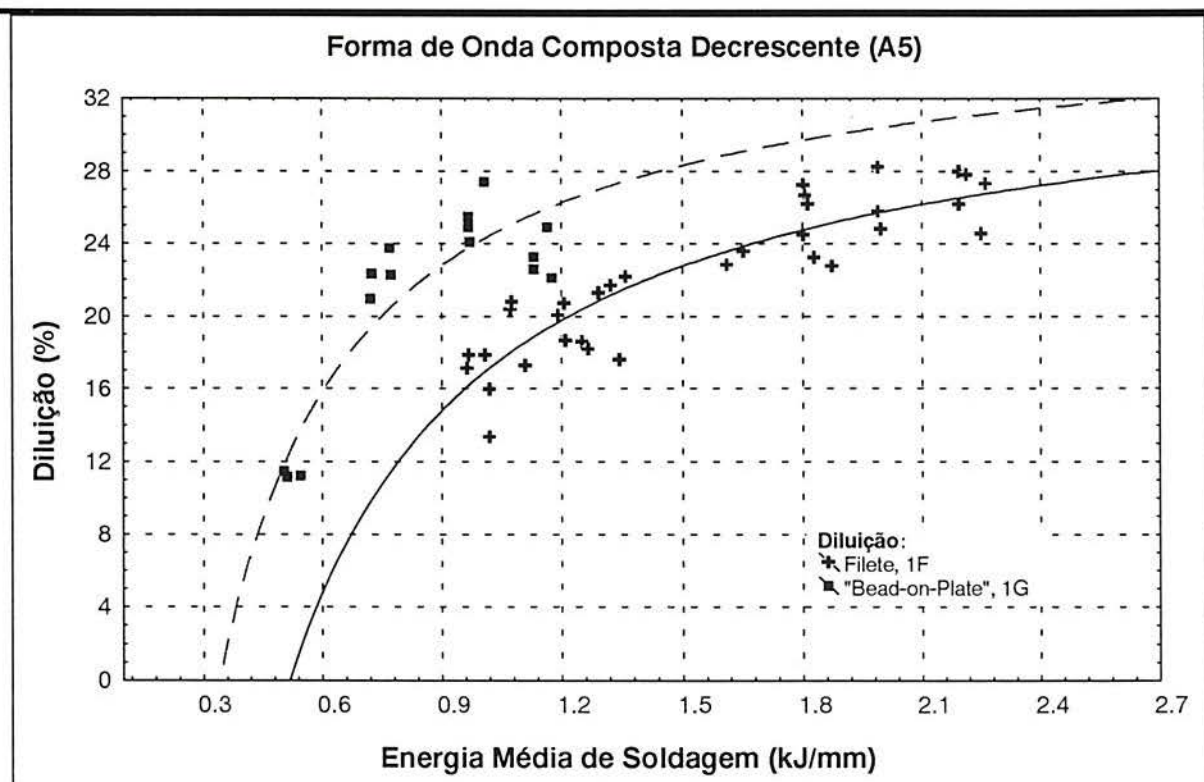


Fig.183: Efeito da energia média de soldagem sobre a diluição, para as juntas tipo "bead-on-plate" e filete, posição plana (1G, 1F), forma de onda composta decrescente (A5).

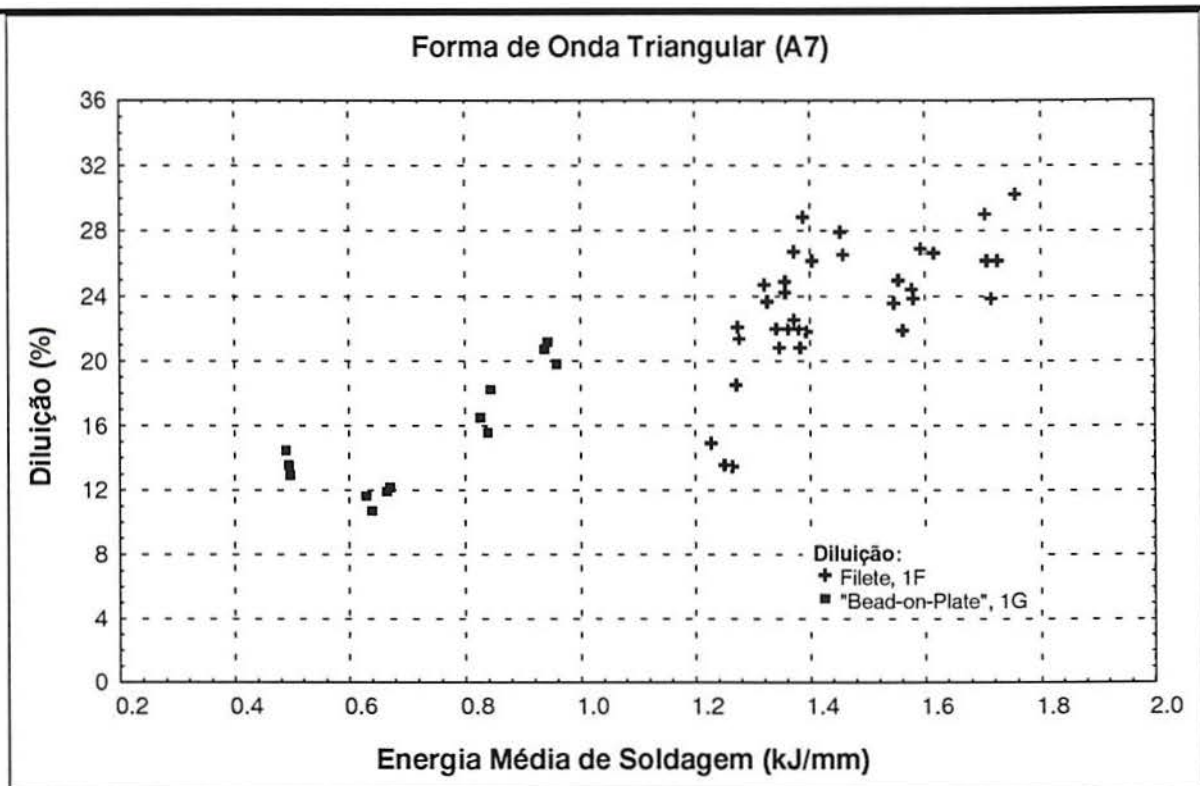


Fig.184: Efeito da energia média de soldagem sobre a diluição, para as juntas tipo "bead-on-plate" e filete, posição plana (1G, 1F), forma de onda triangular (A7).

4.- $\eta_{AR} < \eta_{AB} \Rightarrow D > 50 \text{ (%)}$

Essa condição, de acordo com os valores obtidos, é muito mais difícil acontecer do que a anterior.

A diluição pode ser expressa como segue:

$$D = \frac{\eta_{AB}}{\eta_{AB} + \eta_{fa} \cdot \eta_d} \cdot 100 = \frac{\eta_{AB}}{\eta_p} \cdot 100 \quad (\%) \quad [12.34]$$

Allum *et al.* /57/ obtiveram valores da diluição superior aos 50%, conforme mostrou-se na Fig.39, Cap.7, pág.56. Calculando-se a diluição com os valores das eficiências de η_{AB} de 3 a 8% e máximo de $\eta_p = 30 \text{ %}$, e a equação [12.34], se obtém a diluição no intervalo de 10 a 26,7%, o que demonstra a discrepância nos resultados reportados /57/.

As Figs.182, 183 e 184 mostram o efeito da energia média de soldagem sobre a diluição, para as juntas tipo "bead-on-plate" e filete, posição plana (1G, 1F), para as formas de onda A1, A5 e A7, respectivamente. A diluição é afetada pela configuração da junta, ângulo da tocha e sentido de deslocamento da tocha utilizada para realizar o cordão de solda em filete.

13.- CONCLUSÕES

As principais conclusões desse trabalho podem ser resumidas como:

➤ A forma da onda de tensão de controle da fonte para soldagem tem efeito muito importante sobre o valor da corrente média de soldagem.

➤ Os oscilogramas da tensão do processo e da corrente de soldagem revelam que a tensão do processo varia (rapidamente) em função da variação da corrente de soldagem. Portanto a potência média do sistema deve ser calculada integrando a função da potência instantânea do sistema no período da onda, isto é, para uma função periódica da potência e condição estável.

➤ Os resultados experimentais demonstraram que existe diferença significativa entre o valor da potência média do sistema e o produto da corrente média de soldagem pela tensão média do processo. Essa diferença aumenta conforme o valor da corrente de excesso, também aumenta conforme o tempo de base.

➤ Para o processo MIG/MAG pulsado, foi proposta mediante análise teórico/prática, uma nova relação da taxa média de fusão do arame, a qual é função da potência média do sistema, propriedades físicas e diâmetro do arame, e da eficiência de fusão do arame, $W = K_{fa} \cdot \eta_{fa} \cdot P_m$; a mesma não é afetada significativamente pela forma de onda de saída periódica e não depende da velocidade de soldagem, da configuração e dimensões da junta. Essa relação poderá ser aplicada a outras combinações *material-diâmetro-tipo do arame-gás de proteção*, com a condição de que a onda de saída da fonte seja periódica, assim, se obtém a condição estável.

O valor médio “geral” da eficiência de fusão do arame, obtido com as diferentes formas de onda e juntas analisadas nesse trabalho, para o processo de soldagem MIG/MAG pulsado foi de 21,90 %.

A equação empírica quantitativa determinada entre a taxa média de fusão do arame (igual à velocidade de alimentação do arame) e a potência média do sistema, para as diferentes formas de onda de saída da fonte com polaridade inversa e condição estável, tem a seguinte forma: $W(\text{m/min}) = 992,476 \cdot 10^{-6} \cdot P_m(\text{W})$.

➤ Utilizando a forma de onda retangular, cordão de solda “bead-on-plate” se obteve o valor máximo da eficiência de fusão do processo MIG/MAG pulsado ($\eta_f \approx 33\%$). Os valores máximos obtidos com as formas de onda dente de serra e triangular foram de ($\eta_f \approx 26,7\%$ e de ($\eta_f \approx 27,3\%$, respectivamente. Os resultados da eficiência de fusão do processo (η_f) indicam

que, quanto maior for o tempo de transição da corrente de pico para a corrente de base, e vice-versa, menor é o valor resultante.

Quanto maior for o tempo em que atua a corrente de base, para uma frequência de 25 Hz, menor é o valor da eficiência de fusão do processo obtido, já que a corrente de base é o mínimo necessário para manter aberto o arco elétrico até a aplicação da corrente de pico (produzindo-se fusão do arame e metal base).

➤ Do total de calor fornecido pela fonte de soldagem, somente uma pequena parcela é utilizada para fundir o metal base, e o valor máximo da eficiência de fusão do metal base (η_{AB}) obtido foi de 10%, para $\mathcal{E}_a \approx 1,3$ kJ/mm, forma de onda retangular e cordão de solda “bead-on-plate”. No entanto, para o cordão de solda em filete, forma de onda retangular e para $\mathcal{E}_a \approx 2,8$ kJ/mm, se obteve o valor máximo de (η_{AB}) $\approx 9,8\%$. Desses resultados conclui-se que o tipo de junta exerce um efeito significativo sobre a eficiência do metal base.

As formas de onda diferente da retangular demoram mais tempo para realizar a transição da corrente de base à de pico, e vice-versa. Segundo os resultados experimentais obtidos, essa demora pode traduzir-se numa perda de calor (energia).

➤ A eficiência de fusão do consumível ($\eta_{AB} = \eta_a \cdot \eta_d$) não é afetada pela configuração, dimensão da junta e velocidade de soldagem.

➤ Foi demonstrado que a área transversal do metal de adição não é afetada pela configuração e dimensão da junta. No entanto, depende da taxa média de fusão do arame, da velocidade de soldagem e da eficiência de deposição.

➤ O valor da eficiência de deposição (η_d) determinado empiricamente foi de 97,24%, para o processo MIG/MAG pulsado e as diferentes formas de onda de saída da fonte utilizadas nesse trabalho.

➤ Foi proposta uma nova relação para quantificar a diluição (D , %), a qual é definida pela razão entre as eficiências de fusão do metal base (η_{AB}) e processo (η_p). O valor máximo obtido da diluição foi de 33%, para a forma de onda retangular, cordão de solda em filete e $\mathcal{E}_a \approx 2,6$ kJ/mm.

➤ Os melhores resultados foram apresentados pela forma de onda retangular, independentemente da configuração e dimensão da junta. Os resultados obtidos com as formas de onda dente de serra e triangular foram inferiores sob os aspectos analisados.

14.- SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

A seguintes sugestões para futuros trabalhos, utilizando-se o processo MIG/MAG pulsado, são oferecidas:

(a) Estudar em detalhe a eficiência de fusão do arame, para outras combinações de *material-tipo-diâmetro do arame-gás de proteção*.

(b) Realizar cordões de solda em outras posições de soldagem, e diferentes formas de onda.

(c) Estudar em detalhe a eficiência térmica do processo, para outras combinações de *material-tipo-diâmetro do arame-gás de proteção*.

(d) Analisar os efeitos da forma de onda sobre os mecanismos de transferência da gota.

(e) Realizar medições das quedas de tensão instantânea na extensão do arame e no arco, para determinar as potências na extensão arame e no arco elétrico.

15.- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /1/ AMERICAN WELDING SOCIETY, Welding Handbook, Welding Technology, v.1, 1987.
- /2/ EAGAR, T.W., "An Iconoclast's View of the Physics of Welding - Rethinking Old Ideas", Recent Trends in the Welding research, eds. David, S.A. e Vitek, J.M., ASM, International Materials Park, Ohio, p.1-6, 1990.
- /3/ COBINE, J.D. & BURGER, E.E., "Analysis of Electrode Phenomena in the High-Current Arc", J. Appl. Phys. 26(7), p.895-900, 1955.
- /4/ QUIGLEY, M.B.C.; RICHARDS, P.H.; SWIFT-HOOK, D.T. & GICK, A.E.F., "Heat Flow to the Workpiece from a TIG Welding Arc", J. Phys. D. Appl. Phys. 6, p.2250-2258, 1973.
- /5/ JACKSON, C.E., "The Science of Arc Welding: Parte-II- Consumable Electrode Welding", Welding Journal 39(5), p.177s-190s, 1960.
- /6/ DEFIZE, L.F., "Metal Transfer in Gas-Shielded Arcs", The Welding Institute, London, U.K., p.112-114, 1962.
- /7/ HEZLETT, T.B. & GORDON, G.M., "Studies of Welding Arcs Using Various Atmospheres and Power Supplies", Welding Journal, 36(8), p.382s-386s, 1957.
- /8/ JAHN, R.E. & GOURD, L.M., "Gas-Shielded Welding of Steel", British Commonwealth Welding Conf. The Welding Institute, London, U.K., p.148-155, 1957.
- /9/ LESNEWICH, A., "Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielded Metal-Arc Welding: part II -Control of Metal Transfer", Welding Journal, Sept., 37(9), p.418s-425s, 1958.
- /10/ AMSOM, J.C. & SALTER, G.R., "Analysis of the Gas-Shielded Consumable Metal-Arc Welding System-Effect of Ambient Gas Pressure", British Welding Journal, 9, p.472-483, 1963.
- /11/ PERLMAN, M.; PENSE, A.W. & STOUT, R.D., "Ambient Pressure Effects on Gas Metal-Arc Welding of Mild Steel", Welding Journal, 48(6), p.231s-238s, 1969.
- /12/ NORRISH, J. & RICHARDSON, I.F., "Metal Transfer Mechanisms", Welding and Metal Fabrication, Jan/Feb, v.56, p.17-22, 1988.
- /13/ SCHELLHASE, M., "Der Schweisslichtbogen-ein Technologisches Werk Zeug", 1985, DVS. In:- STENBACKA, N. & PERSSON, K.A., "Shielding Gases for Gas Metal Arc Welding", Welding Journal, Nov., p.41-47, 1989.
- /14/ STENBACKA, N. & PERSSON, K.A., "Shielding Gases for Gas Metal Arc Welding", Welding Journal, Nov., p.41-47, 1989.

- /15/** LESNEWICH, A., "Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielded Metal-Arc Welding: part I:-Control of Electrode Melting Rate", Welding Journal, Aug., 37(8), p.343s-353s, 1958.
- /16/** RHEE, S. & KANNATEY-ASIBU, E. Jr., "Observation of Metal Transfer During Gas Metal Arc Welding", Welding Journal, Oct., p.381s-386s, 1992.
- /17/** LANCASTER, J.F., "Metal Transfer and Mass Flow in the Weld Pool", The Physics of Welding, 1st. ed., Pergamon Press, New York, 1984.
- /18/** AMSOM, J.C., "An Analysis of the Gas-Shielded Consumable Metal Arc Welding System", British Welding Journal, 41(4), p.232-249, 1962.
- /19/** GREENE, W.J., "An Analysis of Transfer in Gas-Shielded Welding Arcs", AIEE Trans., Part II: Applications and Industry, 79, p.194-203, 1960.
- /20/** WASZINK, J.H. & GRAAT, L.H.J., "Experimental Investigation of the Forces Acting on a Drop Weld Metal", Welding Journal, April, v.62(4), p.108s-116s, 1983.
- /21/** AMSON, J.C., "Lorentz Force in the Molten Tip of an Arc Electrode", British Journal, Appl. Phys., v.16 (8), p.1169-1179, 1965.
- /22/** LANCASTER, J.F., "Metal Transfer in Fusion Welding", Proc. Conf. Arc Physics and Weld Pool Behaviour, The Welding Institute, London, May 1979.
- /23/** ALLUM, C.J., "Metal Transfer in Arc Welding as a Varicose Instability: part I-Varicose Instability in a Current-Carrying Liquid Cylinder with Surface Charge", Journal of Physics D. Applied Phys., 18, p.1431-1446, 1985.
- /24/** ALLUM, C.J., "Metal Transfer in Arc Welding as a Varicose Instability: part II-Development of Model for Arc Welding", Journal of Physics D. Applied Phys., 18, p.1447-1468, 1985.
- /25/** NEEDHAM, J.C.; COOKSEY, C.I. & MILNER, D.R., "Metal Transfer in Inert Gas Shielded Arc Welding", British Welding Journal, Feb., v7(2), p.101-114, 1960.
- /26/** WASZINK, J.H. & van den HEUVEL, G.J.P.M., "Heat Generation and Heat Flow in the Filler Metal in GMA Welding", Welding Journal August, 61(8), p.269s-282s, 1982.
- /27/** SCHLICHTING, H., "Boundary-Layer Theory", 6th ed., N. York McGraw-Hill, 1968.
- /28/** KIM, Y-S, & EAGAR, T.W., "Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding", Welding Journal, June, p.269s-278s, 1993.
- /29/** TON, H., "Physical Properties of the Plasma-MIG Welding Arc", Jnl. Phys. D: Appl. Phys., 8, p.922-933, 1975.

/30/ ESSERS, G.W.; JELMORINI, G. & TICHELAAR, G.W., "Electrode Phenomena with Plasma-MIG Welding Arc", Proc. 2nd. Int. Conf. on Gas Discharges, London: IEE Conf. Pub. n° 90, Sept., p.135-137, 1972.

/31/ WASZINK, J.H. & GRAAT, L.H.J., "Der Einfluss der Gasstroemung auf die Tropfenablosung beim Plasma-MIG Schweißen", Grosse Schweisstechnique Tagung, DVS Berichte, 1979, 57:198-203. In:- KIM, Y-S, & EAGAR, T.W., "Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding", Welding Journal, June, p.269s-278s, 1993.

/32/ LORD RAYLEIGH, "On the Instability of Jets", Proceeding London Mathematical Society, 10, p.4-13, 1879. In:- LANCASTER, J.F., "Metal Transfer in Fusion Welding", Proc. Conf. Arc Physics and Weld Pool Behaviour, The Welding Institute, London, May 1979.

/33/ ANNO, J.N., "The Mechanics of Liquid Jets", Lexington Books, Lexington, Mass. USA.

/34/ QUIGLEY, M.B.C. & WEBSTER, J.M., "Observations of Exploding Droplets in Pulsed Arc GMA Welding", Welding Journal, Nov., v.50 (11), p.461s-466s, 1971.

/35/ MA, J. & APPS, R.L., "New MIG Process Results from Metal Transfer Mode Control", Welding and Metal Fabrication, May, p.168-175, 1983.

/36/ HEILE, R.F. & HILL, D.C., "Particulate Fume Generation in Arc Welding Process", Welding Journal, v.54 (7), p.201s-210s, 1975.

/37/ MA, J. & APPS, R.L., "MIG Transfer Discovery of Importance to Industry", Welding and Metal Fabrication, Sep., v.50 (7), p.210-235, 1982.

/38/ MA, J. & APPS, R.L., "Analysing Metal Transfer During MIG", Welding and Metal Fabrication, April, v.51 (3), p.119-128, 1983.

/39/ AMIN, M., "Synergic Pulse MIG Welding", Metal Construction, June, 13(6), p.349-353, 1981.

/40/ AMIN, M., "Pulse Current Parameters for Arc Stability and Controlled Metal Transfer in Arc Welding", Metal Construction, May, 15 (5), p.272-278, 1983.

/41/ AMIN, M. & WATKINS, P.V.C., "Synergic Pulse MIG Welding", Welding Institute Members Report 46/1977/P.

/42/ SMATI, Z., "Automatic Pulsed MIG Welding", Metal Construction, Jan., 18 (1), p.38R-44R, 1986.

/43/ LUND, R.A., "Multivariable Computer Control of a Gas Metal Arc Welding Processes", Ph.D. Thesis, University of Wisconsin-Madison, 1979. In:- SMATI, Z., "Automatic Pulsed MIG Welding", Metal Construction, Jan., 18 (1), p.38R-44R, 1986.

- /44/ WASZINK, J.H. & van den HEUVEL, G.J.P.M., "Measurements and Calculation of the Resistance of the Wire Extension in Arc Welding", Proc. Conf. Arc Physics and Weld Pool Behaviour, The Welding Institute, London, 8-10 May 1979.
- /45/ HALMØY, E., "Wire Melting Rate, Droplet Temperature, and Effective Anode Melting Potential", Proc. Conf. Arc Physics and Weld Pool Behaviour, The Welding Institute, London, 8-10 May 1979.
- /46/ MATSUDA, F.; USHIO, M. & TANAKA, Y., "Metal Transfer Characteristics in Pulsed GMA Welding", Transactions of JWRI, 12 (1), p.9-17, 1983.
- /47/ ALLUM, C.J., "MIG Welding-Time for a Reassessment", Metal Construction, June, p.347-353, 1983.
- /48/ MANZ, A.F., "The One Knob Welder", Welding Journal, Sep., p.720-725, 1968.
- /49/ KOHN, G. & SIEWERT, T.A., "The Effect of Power Supply Response Characteristics on Droplet Transfer of GMA Weld", Proc. ASM Conf. Advances in Welding Science and Technology, Gatlinburg, Tenn.
- /50/ RICHARDSON, I.M.; BUCKNALL, P.W. & STARES, I., "The Influence of Power Source Dynamics on Wire Melting Rate in Pulsed GMA Welding", Welding Journal, Feb., p.32s-37s, 1994.
- /51/ MAURO, H. & HIRATA, Y., "Study on Pulsed MIG Welding", International Institute Welding, DOC. SG 212-585-84.
- /52/ UEGURI, S.; HARA, K. & KOMURA, H., "Study of Metal Transfer in Pulsed GMA Welding", Welding Journal, Aug., p.242s-250s, 1985.
- /53/ QUINTINO, L. & ALLUM, C.J., "Pulse GMAW-Interactions Between Process Parameters Part 1", Welding and Metal Fabrication, March, p.85-89, 1984.
- /54/ QUINTINO, L. & ALLUM, C.J., "Pulse GMAW - Interactions Between Process Parameters Part 2", Welding and Metal Fabrication, April, p.126-129, 1984.
- /55/ NILES, R.W. & JACKSON, C.E., "Weld Thermal Efficiency of the GTAW Process", Welding Journal, Jan., 54 (1), p.25s-32s, 1975.
- /56/ ALLUM, C.J. & QUINTINO, L., "Control of Fusion Characteristics in Pulsed Current MIG Welding - Part 1", Metal Construction, Apr., 17(4), p.242R-245R, 1985.
- /57/ ALLUM C.J. & QUINTINO, L., "Control of Fusion Characteristics in Pulsed Current MIG Welding - Part 2", Metal Construction, May, 17 (4), p.314-317R, 1985.
- /58/ AMIN, M., "Microcomputer control of Synergic Pulsed MIG Welding", Metal Construction, April, p.216-221, 1986.

- /59/ TRINIDADE, E., MSc Thesis, School of Industrial Science, Cranfield, 1982. In: ALLUM C.J., "MIG Welding-Time for a Reassessment", Metal Construction, June, p.347-353, 1983.
- /60/ MIDDLETON, P. & NORRISH, J., "Progress in Controlled Transfer Welding", Welding and Metal Fabrication, Nov., p. 497-504, 1990.
- /61/ NORRISH, J., "MIG Welding Power Sources", Welding & Metal Fabrication, March, p.63-68, 1992.
- /62/ HALMØY, E., "Current-Voltage Process Characteristics in GMAW", International Institute Welding, Doc. 212-773-90, 1990.
- /63/ SCHOECK, P.A., "An Investigation of the Anode Energy Balance of High Intensity Arcs in Argon", Modern Developments in Heat Transfer, ed. W. Ibele, New York, Academic Press, p.363-364, 1963.
- /64/ FINKELNBURG, W. & SEGAL, S.M., "The Potential Field in and Around a Gas Discharge, and its Influence on the Discharge Mechanism", Phys. Reviews 83(3), p.582-585, 1951.
- /65/ BLOCK, Von M.J. & FINKELNBURG, W., "Über die Axiale Ausdehnung des An-odenfallgebiets beim Kohlelichtbogen", Z. Naturforsch 8A: 758, 1953.
- /66/ BUSZ-PEUCKERT, G. & FINKELNBURG, W., "Die Abhängigkeit des Anodenfalles von Stromstärke und Bogenlänge bei Hochtemperaturbögen", Z. für Physik. 140, p.540-546, 1955.
- /67/ BUSZ-PEUCKERT, G. & FINKELNBURG, W., "Zum Anodenmechanismus der Thermischen Argonbögen", Z. für Physik. 144, p.244-251, 1956.
- /68/ DICKSON, D.J. & Von ENGEL, A., "Resolving the Electrode Fall Spaces of Electric Arcs", Proc. Roy. Soc. 300, p.316-325, 1967.
- /69/ WILKINSON, J.B. & MILNER, D.R., "Heat Transfer from Arcs", Brit. Weld. Jnl. 2, p.115-118, 1960.
- /70/ GUILLE, A.E.; HILTON, M.A.; McLELLAND, I.A. & REEVES-SAUNDERS, R., "Arc Current Distribution in Continious High Speed Anode Tracks", J. Phys. D. Appl. Phys. 8, p.964-970, 1975.
- /71/ DINULESCO, H.A. & PFENDER, E., "Analysis of the Anode Boundary Layer of High Intensity Arcs", J. Appl. Phys. 51(6), p.3149-3157, 1980.
- /72/ SANDERS, N.A. & PFENDER, E., "Measurements of Anode Falls and Anode Heat Transfer in Atmospheric Pressure High Intensity Arcs", J. Appl. Phys. 55(3), p.714-722, 1984.

- 73/** HSU, K.C. & PFENDER, E., "Analysis of the Cathode Region of a Free-Burning High Intensity Argon Arcs", J. Appl. Phys. 54, p.3818-3824, 1983.
- 74/** DELALONDRE, C. & SIMONIN, O., "Modelling of High Intensity Arcs Including a Non-Equilibrium Description of the Cathode Sheath", Colloque de Physique 51: C5-199-206, 1990.
- 75/** ZHU, P.; LOWKE, J.J. & MORROW, R., "A United Theory of Free Burning Arcs, Cathode Sheaths and Cathodes", J. Phys. D. Appl. Phys. 25, p.1221-1230, 1992.
- 76/** PINTARD, J., "Some Experimental Data on Short-Circuit Transfer", Physics of the Welding Arc, The Welding Institute, London, p.92-97, 1962.
- 77/** GUILLE, A.E., "Studies of Short Electric Arcs in Transverse Magnetic Fields with Application to Arc Welding", Welding in the World 8(1), p.35-53, 1970.
- 78/** VIJH, A.K., "The Improved Electrochemical Theory for the Quantitative Estimation of the Magnitudes of Cathode Fall Voltages in Pure Metals Arcs", J. de Chem. Phys. 73(5), p.566-568, 1976.
- 79/** GRAKOV, V.E., "Cathode Fall of an Arc Discharge in a Pure Metal", Soviet Physics-Technical Physics 12(2), p.286-292, 1967.
- 80/** JÖNSSON, P.G., SZEKELY, J., MADIGAN, R.B. & QUINN, T.P., "Power Characteristics in GMAW: Experimental and Numerical Investigation", Welding Journal, March, p.93s-102s, 1995.
- 81/** MADIGAN, R.B. & QUINN, T.P., "Sensing Droplet Detachment and Electrode Extension for Control of Gas Metal Arc Welding", Conf. Proc. 3rd ASM Int. Trends in Welding Research, ASM International, Materials Park, Ohio, p.999-1002, 1992.
- 82/** AMERICAN WELDING SOCIETY, Welding Handbook, Miami, Florida, v.2, p.110-115, 1991.
- 83/** SHULTZ, B.L., & JACKSON, C.E., "Influence of Weld Bead Area on Weld Metal Mechanical Properties", Welding Journal, January, p.26s-37s, 1973.
- 84/** JACKSON C.E., & SHRUBSALL, A.E., "Energy Distribution in Electric Welding", Welding Journal, May, p.231s-241s, 1950.
- 85/** CHANDEL, R.S., "Electrode Melting and Plate Melting Efficiencies of Submerged Arc Welding and Gas Metal Arc Welding", Materials Science and Technology, August, p.772-777, 1990.
- 86/** JELMORINI, G.; TICHELAAR, G.W. & van den HEUVEL, G.J.P.M., "Droplet Temperature Measurements in Arc Welding", Int. Institute Welding, Doc. 212-411-77.

/87/ ESSER, W.G. & WALTER, R., "Some Aspects of the Penetration Mechanisms in the Metal-Inert-Gas (MIG) Welding", Proc. Conf. Arc Physics and Weld Pool Behaviour, The Welding Institute, London, May 1979.

/88/ BORCHARDT, I.G. & ZARO, M.A., "Instrumentação, Guia de Aulas Práticas", Ed. Universitária, Porto Alegre, Brasil, 1982.

/89/ HINES, W.W. & MONTGOMERY, D.C., "Probability and Statistics in Engineering and Management Science", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1980.

/90/ WELLS, A.A., "Heat Flow in Welding", Welding Journal, May, p.263s-267s, 1952.

/91/ SWIFT-HOOK, D.T. & GICK, A.E.F., "Penetration Welding with Lasers", Welding Journal, November, p.492s-499s, 1973.

/92/ WHITE, D.; WOODACRE, A. & TAYLOR, A.F., "Advances in Automatic Welding Control", Proc. Conf. Welding Research Related to Power Plat. CEGB, Marchwood, Paper 52, Sept., 1972.

/93/ HIRATA, H.; MORIZAMA, M.; FUJIMORA, H. & OKUBO, R., "Development of Automatic Boiler Tube Welding Systems", Mitsubishi Heavy Industries, Technical Review, Feb., 1983.

/94/ LUCAS, W., "Computer in Arc Welding - The Next Industrial Revolution; Part-3: Instrumentation and Process Analysis", Metal Construction, July, p.431-436, 1985.

/95/ JOHNSON, N.L. & LEONE, F.C., "Statistics and Experimental Design in Engineering and the Physical Sciences", Vol. I e II, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1977.

/96/ SNEDECOR, G.W. & COCHRAN, W.G., "Statistical Methods", The IOWA State University Press, 1980.

/97/ BOX, G.E.P., HUNTER, W.G. & HUNTER, J.S., "Statistics for Experimenters", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1978.

ANEXOS

Anexo 1 - Utilização dos Microcomputadores na Soldagem.

Anexo 2 - Estatística Experimental.

Anexo 3 - Função Discreta.

Anexo 4 - Perfis Digitalizados da seção transversal do cordão de solda Filete.

Anexo 5 - Processo MIG/MAG Convencional.

Anexo 6 - Forma de Onda Dente de Serra - Cálculo da Corrente Média de Soldagem.

Anexo 7 - Termos e Definições

ANEXO 1

Utilização dos Microcomputadores na Soldagem

Os microcomputadores estão sendo intensivamente utilizados nos projetos de instrumentação e controle dos parâmetros de soldagem mediante monitorização. As características comuns dos instrumentos são: flexibilidade; armazenamento de dados; análise dos dados.

A aplicação do computador no equipamento para monitorar processos de soldagem foi bastante usado no passado com propósito especial. Porém, o mesmo é muito caro para sistemas de monitorização das operações de soldagem de altíssima qualidade como, por exemplo, processo TIG empregado em plantas nucleares /92/, e em tubos utilizados em aquecedores de caldeiras /93/. Porém, com o advento de instrumentos para propósitos gerais /94/, e a progressiva redução de custos dos microcomputadores, estes podem ser empregados em nível industrial a baixo custo.

O Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas (*LS&TC*) tem realizado vários trabalhos utilizando o processo MIG/MAG pulsado sinérgico, esses com forma de onda retangular. Na atualidade, o principal objetivo é anular a parte inteligente da máquina, para ligar a um computador, no qual poderá ser programada a forma da onda que se deseja usar; por exemplo: retangular, trapezoidal, triangular, e outros.

As fontes atuais utilizam para o controle dos parâmetros do pulso de forma retangular a tecnologia dos microprocessadores. Onde os dados são armazenados na memória EPROM (Erasable Programmable Read Only Memory), e é necessário o fornecimento do tipo de material e diâmetro do arame, sendo o gás determinado pelo material do arame, e a velocidade de alimentação de arame para que os parâmetros sejam ajustados automaticamente. Tem-se o inconveniente de que o microprocessador possui poucos programas na EPROM, sendo que, para muitos materiais de arame a combinação dos parâmetros do pulso devem ser estabelecidos.

ANEXO 2

Estatística Experimental

1.- Projeto Fatorial /89, 95-97/

Considerando o elevado número de variáveis envolvidos no processo de soldagem, mas também a complexidade trazida pela interação entre as variáveis, é necessário o emprego de técnicas menos convencionais na avaliação dos problemas que se apresentam. A aplicação de técnicas de estatística experimental torna o procedimento de análise mais confiável, seguro e reproduzível.

Geralmente, a determinação dos efeitos dos parâmetros de soldagem sobre uma dada propriedade é obtida por *tentativa e erro*, após a realização de um elevado número de soldas. Além disso, a presença de interações dificulta a análise dos parâmetros sobre a resposta. Entretanto, as mesmas conclusões poderiam ser alcançadas, analisando-se um pequeno número de experiências, estabelecidas estatisticamente.

Suponha-se que o propósito é investigar os efeitos de cada fator em um intervalo preestabelecido, dado por níveis dos fatores, os quais serão usados no experimento. O objetivo, portanto, é maximizar a informação dos fatores sobre a resposta. Para se conduzir uma experimentação desse tipo, têm-se duas opções:

- ♦ Tratar um único fator por vez, fixando todos os outros;
- ♦ Incluir todos os fatores simultaneamente empregando um projeto fatorial.

O projeto fatorial é a opção menos onerosa para se conduzir um experimento, quando o número de variáveis controláveis é elevado em um dado processo. Obtém-se, assim, uma considerável redução no tempo e material dedicado ao experimento.

Ao iniciar uma investigação, pode ser planejada a realização de um grande número de experiências. Entretanto, é possível que poucos dados preliminares sejam necessários para indicar quais são os fatores mais importantes (significativos), e com esses fatores realizar experiências no intervalo desejado. Assim, ganha-se em simplicidade quando os fatores a serem analisados são muitos, ainda quando os valores da experiência disponíveis são difíceis de organizar.

Portanto, experimentos fatorais são particularmente apropriados para descrever o comportamento empírico do processo no intervalo analisado.

2.- Fundamentos de Correlação e de Regressão

Muitas vezes, os valores experimentais de dois parâmetros (Y e X , por exemplo), sugerem um relacionamento funcional entre eles. Quando esses valores são apresentados em um diagrama, pode-se traçar uma linha média, ou “linha de regressão”, que explica uma parcela da variação de y com x . Essa linha pode ser representada por uma função de regressão que justifica, em média, a variação de uma das variáveis com a outra. Existirá entretanto uma variação aleatória em torno dessa linha, que é chamada de variação residual /96/. Em muitos casos, a variável x (dita variável “independente”) é suposta sem erro, continua e controlada, enquanto que a variável y (dita variável “dependente”) apresenta uma parcela da variação residual, a qual é responsável pela dispersão dos pontos experimentais em torno da linha de regressão.

Se a verdadeira função de regressão entre y em função de x é linear, a observação de y para cada nível de x é uma variável aleatória, e os valores esperados de y para cada valor de x é da forma /96/:

$$E(y|x) = \beta_0 + \beta_1 \cdot x$$

Onde os parâmetros, β_0 e β_1 , da linha reta de regressão são valores constantes desconhecidos.

Supondo que cada valor observado, y , pode ser descrito mediante a função da forma:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x + \varepsilon$$

Onde ε é uma variável aleatória com média zero e variância σ^2 , $\varepsilon \rightarrow N(0, \sigma)$.

ANEXO 3

Função Discreta

Se $x_{(t)}$ é a função obtida do processo de medição através da conversão do sinal Analógico para Digital (A/D), e os valores de $x_{(t)}$ estão regularmente espaçados em função do tempo, como mostra a Fig.A3-1, os valores discretos da função ($x_{(t)}$) são obtidos num intervalo Δt constante, o valor de $x_{(t)}$ no tempo $t = m \cdot (n \cdot \Delta t)$ e $\Delta t = T/n$ é x_r , com a seguinte seqüência de valores $\{x_r\}$; $r = 0, 1, 2, 3, \dots, n$; $1, 2, 3, \dots, m$.

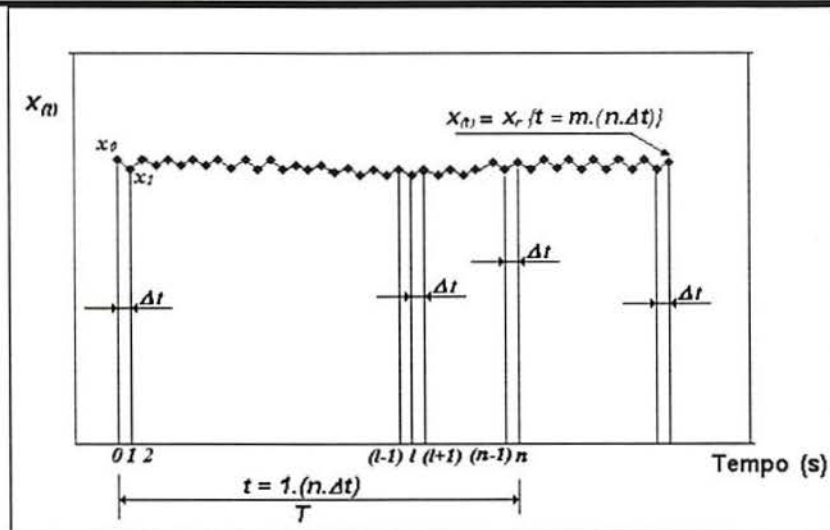


Fig.A3-1: Na figura são mostrados os valores discretos do sinal analógico obtido e (corrente, velocidade de alimentação do arame, etc.) o intervalo (Δt) de aquisição dos valores.

Na prática, a corrente, tensão, etc., são funções representadas por valores contínuos (analógicos), e na saída do conversor A/D são convertidos em valores discretos. Esses valores podem aproximar-se a uma função contínua mediante a determinação correta do intervalo para a leitura dos valores (frequência de aquisição de dados). No entanto, essa frequência depende da capacidade do sistema de aquisição, composto de microcomputador-placa A/D-e outros. Quando se dispõe de valores discretos obtidos numa frequência ótima, as equações definidas

pela integrais, por exemplo: $I_m = \frac{1}{(i) \cdot T} \cdot \int_{t_0 + (i-1)T}^{t_0 + (i)T} i_{(t)} \cdot dt$ (A), transforma-se em somatório, como

segue:

Corrente média de soldagem

$$I_m = \frac{1}{m \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{l=0}^n i_{il(t)} \quad (A) \quad 0 \leq t(s) \leq m \cdot T (= m \cdot n \cdot \Delta t) \quad [1]$$

Potência média do sistema

$$P_m = \frac{1}{m \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{l=0}^n p_{il(t)} = \frac{1}{m \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{l=0}^n i_{il(t)} \cdot u_{il(t)} \quad (\text{W}) \quad 0 \leq t(\text{s}) \leq m \cdot T (= m \cdot n \cdot \Delta t) \quad [2]$$

Energia

$$E_a = \sum_{i=1}^m \sum_{l=0}^n p_{il(t)} = \sum_{i=1}^m \sum_{l=0}^n i_{il(t)} \cdot u_{il(t)} \quad (\text{J}) \quad 0 \leq t(\text{s}) \leq t_f (= m \cdot n \cdot \Delta t) \quad [3]$$

Energia Média de Soldagem

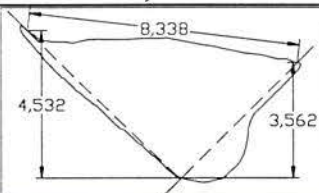
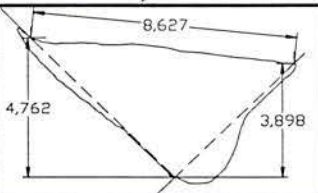
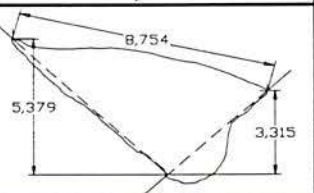
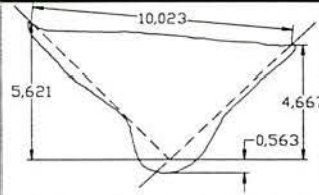
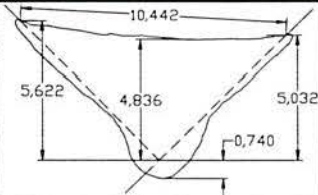
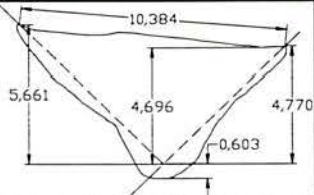
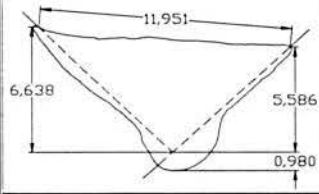
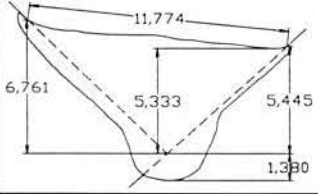
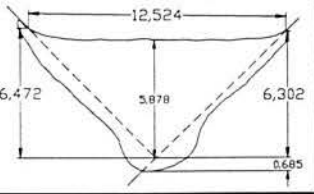
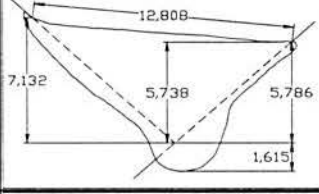
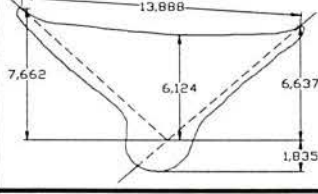
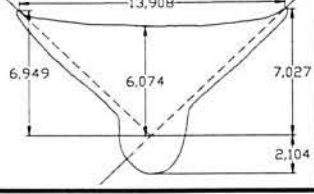
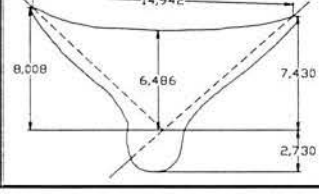
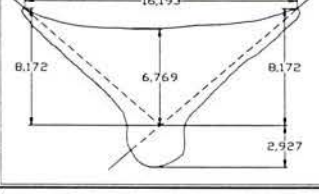
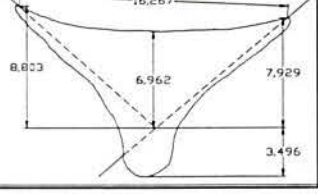
$$\mathcal{E}_a = \frac{1}{V_S} \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{l=0}^n \frac{p_{il(t)}}{m \cdot n} = \frac{1}{V_S} \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{l=0}^n \frac{i_{il(t)} \cdot u_{il(t)}}{m \cdot n} = \frac{P_m}{V_S} \quad (\text{J} / \text{mm}) \quad [4]$$

ANEXO 4

Perfis Digitalizados da Seção Transversal do Cordão de Solda Filete

Apesar de não ter sido analisada a geometria do cordão de solda, são mostrados na Tabela A4-1 os perfis digitalizados da seção transversal do cordão de solda, para a forma de onda retangular (A1), junta tipo filete, posição plana (1F), em função da frequência da onda e da tensão de controle de pico, V_{R-p} , da fonte de soldagem.

Tab.A4-1: Perfil digitalizado da seção transversal do cordão de solda, forma de onda retangular (A1), junta tipo filete, posição plana (1F).

Frequência da Onda	Tensão de Controle de Pico, V_{R-p} , da Fonte.		
	7,5 V	8,0 V	8,5 V
$F = 100 \text{ Hz}$			
$F = 150 \text{ Hz}$			
$F = 200 \text{ Hz}$			
$F = 250 \text{ Hz}$			
$F = 300 \text{ Hz}$			

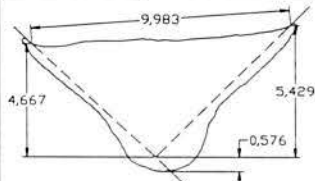
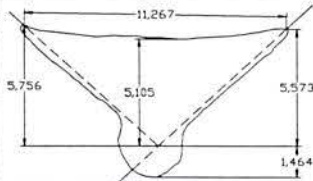
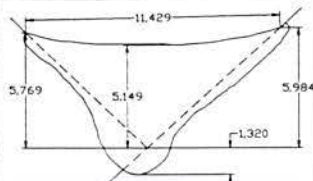
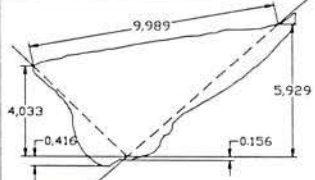
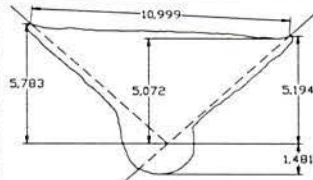
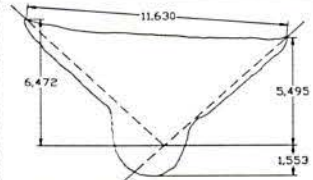
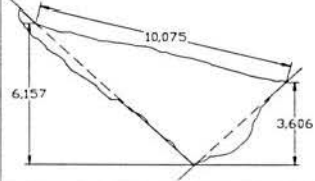
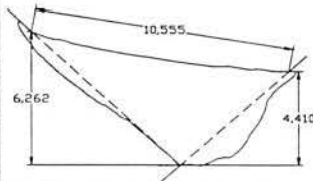
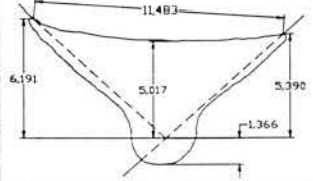
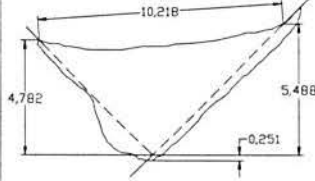
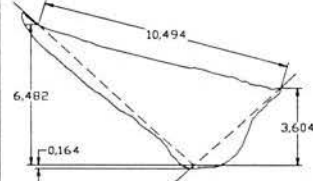
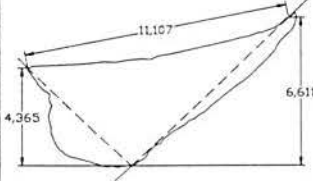
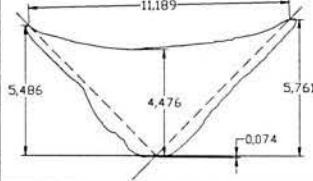
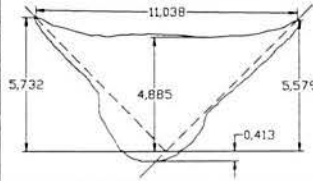
Apesar de não ter sido analisada a geometria do cordão de solda, são mostrados na Tabela A4-2 os perfis digitalizados da seção transversal do cordão de solda, para a forma de onda composta decrescente (A5), junta tipo filete, posição plana (1F), em função da frequência da onda e da tensão de controle de pico, V_{R-p} , da fonte de soldagem.

Tab.A4-2: Perfil digitalizado da seção transversal do cordão de solda, forma de onda composta decrescente (A5), junta tipo filete, posição plana (1F).

Frequência da Onda	Tensão de Controle de Pico, V_{R-p} , da Fonte.		
	7,5 V	8,0 V	8,5 V
$F = 100 \text{ Hz}$			
$F = 150 \text{ Hz}$			
$F = 200 \text{ Hz}$			
$F = 250 \text{ Hz}$			

Apesar de não ter sido analisada a geometria do cordão de solda, são mostrados na Tabela A4-3 os perfis digitalizados da seção transversal do cordão de solda, para a forma de onda triangular (A7), junta tipo filete, posição plana (1F), em função da frequência da onda e da tensão de controle de pico, V_{R-p} , da fonte de soldagem.

Tab.A4-3: Perfil digitalizado da seção transversal do cordão de solda, forma de onda triangular (A7), junta tipo filete, posição plana (1F).

Frequência da Onda	Tensão de Controle de Pico, V_{R-p} , da Fonte.		
	7,5 V	8,0 V	8,5 V
$F = 100 \text{ Hz}$			
$F = 150 \text{ Hz}$			
$F = 200 \text{ Hz}$			
$F = 250 \text{ Hz}$			
$F = 300 \text{ Hz}$	Não foi possível obter-se estabilidade durante a realização do cordão de solda.		

ANEXO 5

.- Processo MIG/MAG Convencional

Os parâmetros mantidos constantes na realização do cordão de solda, utilizando-se o processo MIG/MAG convencional, são mostrados na Tabela A5-1.

Tab.A5-1: Parâmetros operacionais mantidos constantes durante a realização dos cordões de solda filete, 1F.

Parâmetro	Valor
Distância bico de contato-metal base	20 mm
Eletrodo: diâmetro, material	1,2 mm; (AWS A5.18-79) ER70 S-6
Vazão e tipo de gás	20 l/min; Ar+4%CO ₂
Metal base	Aço baixo carbono (SAE 1020)
Dimensão do Metal Base (M.B.)	2x(270x80x9,6 mm)
Temperatura dos M.B.	Ambiente
Velocidade de soldagem (V_s)	4 mm/s
Tipo de junta e posição	Filete, posição plana (1F)
Polaridade	Eletrodo Positivo (CCEP)
Ângulo da tocha	0°
Condução da tocha	Dispositivo Mecanizado

O objetivo de realizar o cordão de solda em junta tipo filete, utilizando-se o processo MIG/MAG convencional, foi comparar as características de fusão, eficiências de fusão do arame, do consumível, do metal base e do processo, e diluição, com os valores obtidos com o processo MIG/MAG pulsado. A corrente de soldagem e a tensão do processo foram otimizadas para se obter transferência estável, modo de transferência aerossol projetado. Também foram registrados os oscilogramas da corrente de soldagem, tensão do processo e potência do sistema, como mostra as Figs.A5-1 e A5-2.

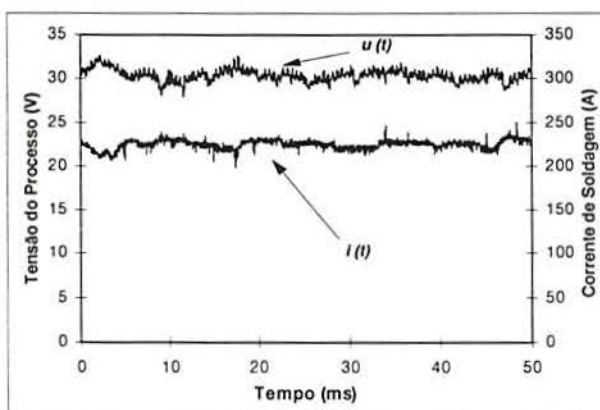


Fig.A5-1: Tensão do processo e corrente de soldagem em função do tempo, para o processo MIG/MAG convencional, junta filete, 1F.

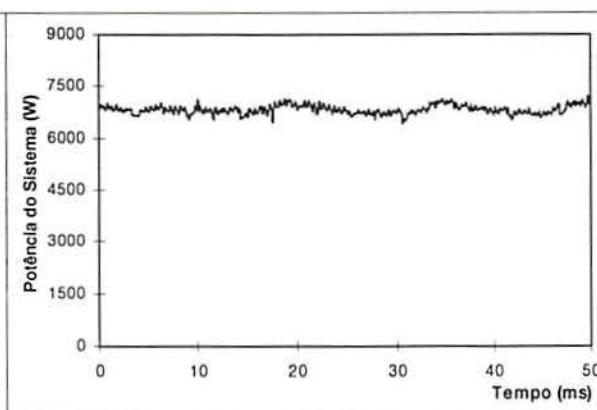


Fig.A5-2: Potência do sistema em função do tempo, para o processo MIG/MAG convencional, junta filete, 1F.

Na Tabela A5-2 são mostrados os valores da corrente de soldagem (I), potência do sistema (P), eficiências de fusão do arame (η_a), do consumível (η_{AR}), do metal base (η_{AB}) e do processo (η), e a diluição (D).

Tab.A5-2: Valores da corrente, potência, e características de fusão, MIG/MAG convencional.

	I (A)	P (W)	η_a (%)	η_{AR} (%)	η_{AB} (%)	η (%)	D (%)
	230,3	6923,6	20,567	19,741	7,984	27,725	28,795
	228,3	6912,1	20,601	19,958	7,497	27,455	27,307
	229,1	6919,8	20,578	19,331	7,376	26,707	27,617
Média	229,2	6918,5	20,582	19,677	7,619	27,296	27,906

Onde:

I = Corrente (contínua) de soldagem, (A);

P = Potência do sistema, (W);

η_a = Eficiência de fusão do arame, (%);

η_{AR} = Eficiência de fusão do consumível, (%);

η_{AB} = Eficiência de fusão do metal base, (%);

η = Eficiência de fusão do processo (MIG/MAG convencional), (%);

D = Diluição, (%).

A Fig.A5-3 mostra o perfil digitalizado da seção transversal do cordão de solda. Nas três seções transversais houve falta de penetração.

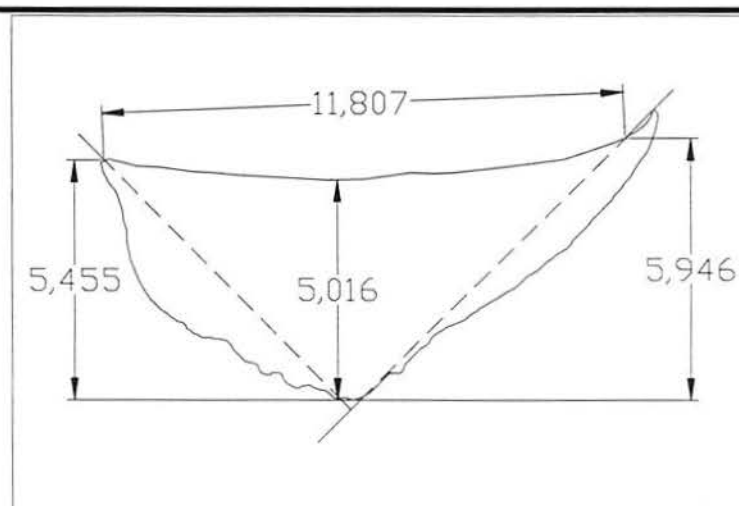


Fig.A5-3: Perfil digitalizado da seção transversal do cordão de solda, processo MIG/MAG convencional, junta tipo filete, posição plana, Ar+4%CO2, arame ER 70 S-6, $d = 1,2$ mm.

ANEXO 6

.- Forma de Onda Dente de Serra - Cálculo da Corrente Média de Soldagem

Aplicação prática das fórmulas desenvolvidas, no Cap.9, no cálculo de alguns valores da corrente média de soldagem, para a forma de onda dente de serra (A3).

As Figs.66c, 75-78 mostram os formatos do pulso da onda entre a tensão de controle da fonte e a corrente de soldagem e tensão do processo, e potência do sistema em função do tempo. Utilizando-se os oscilogramas de corrente é possível obter-se os valores dos parâmetros necessários para o cálculo do valor da corrente média de soldagem (I_m).

Utilizando-se os valores dos parâmetros obtidos dos oscilogramas é necessário aplicar a seguinte equação:

$$I_m = \frac{I_p \cdot T_2 + I_b \cdot T_3 + I_b \cdot (T_1 + T_4)}{T_1 + T_2 + T_3 + T_4} + \frac{\left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right)_s \cdot \left(\frac{T_1^2}{2}\right) - \left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right)_d \cdot \left(\frac{T_3^2}{2}\right)}{T_1 + T_2 + T_3 + T_4} \quad [1]$$

1.- F = 25 Hz

Os parâmetros medidos são os seguintes:

$T_1 = 6,80 \text{ ms}$; $T_2 = 0$; $T_3 = 1,0 \text{ ms}$; $T_4 = 32,2 \text{ ms}$; $I_b = 60 \text{ A}$; $I_p = 300 \text{ A}$;

$\left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right)_s = 35,3 \text{ A/ms}$; $\left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right)_d = 240 \text{ A/ms}$;

$$I_m = \frac{300 \cdot 1 + 60 \cdot (6,8 + 32,2)}{40} + \frac{35,3 \cdot \left(\frac{6,8^2}{2}\right) - 240 \cdot \left(\frac{1^2}{2}\right)}{40} = 83,4 \text{ (A)} \quad [2]$$

O valor da corrente média calculado é 83,4 A, enquanto que o valor obtido por integração numérica é 81,2 A.

2.- F = 50 Hz

Os parâmetros medidos são os seguintes:

$T_1 = 6,20 \text{ ms}$; $T_2 = 0$; $T_3 = 1,2 \text{ ms}$; $T_4 = 12,6 \text{ ms}$; $I_b = 60 \text{ A}$; $I_p = 313 \text{ A}$;

$\left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right)_s = 40,81 \text{ A/ms}$; $\left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right)_d = 210,8 \text{ A/ms}$;

$$I_m = \frac{313 \cdot 1,2 + 60 \cdot (6,2 + 12,6)}{20} + \frac{40,81 \cdot \left(\frac{6,2^2}{2}\right) - 210,8 \cdot \left(\frac{1,2^2}{2}\right)}{20} = 105,6 \text{ (A)} \quad [3]$$

O valor da corrente média calculado é 105,6 A, enquanto que o valor obtido por integração numérica é 106,9 A.

ANEXO 7

.- Termos e Definições

Eficiência de fusão do arame (η_a) é definida como a quantidade de energia utilizada para fundir o arame dividido pela energia fornecida pela fonte ao sistema.

Coeficiente de fusão do arame (K_{fa}) é função do diâmetro, da composição, do tipo e das propriedades físicas do arame (h_a).

Taxa média de fusão do arame (W_{fa}) é função da eficiência de fusão, da composição química e da seção transversal do arame. W_{fa} pode ser obtida conhecendo-se os valores da potência média (P_m), da eficiência de fusão do arame (η_a) e do coeficiente de fusão do arame (K_{fa}).

A velocidade de alimentação do arame (W) é igual à taxa média de fusão do arame (W_{fa}), para uma periodicidade nas ondas da corrente de soldagem e tensão do processo em função do tempo, bem como a estabilidade na transferência de massa e no comprimento do arco elétrico.

Energia média de soldagem (\mathcal{E}_a) é definida como a relação potência média do sistema (P_m) e a velocidade de soldagem (V_s).

Eficiência de fusão do consumível (η_{AR}) é função da área transversal do metal de adição (AR), propriedades físicas do arame (h_a) e da energia média de soldagem (\mathcal{E}_a).

Eficiência de fusão do metal base (η_{AB}) é função da área transversal fundida do metal base (AB), propriedades físicas do metal base (h_{mb}) e da energia média de soldagem (\mathcal{E}_a).

Eficiência de fusão do processo (η_p) pode ser calculada a partir da soma das eficiências de fusão do metal base (η_{AB}) e do consumível (η_{AR}).

Potência do sistema é composta pela soma das potências no bico de contato, na extensão do arame, no arco elétrico, e outras presente no circuito de medição.

Sistema é composto pelo bico de contato, extensão do arame, arco elétrico, e outros tipos de resistência elétrica presente no circuito de medição.

Tensão do processo é determinada somando-se as queda de tensão entre o bico de contato e o metal base, definido como circuito de medição. Os pontos de medição da tensão do processo (o mais próximo possível ao bico de contato e metal base)